

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica



**RESISTENCIA A COMPRESIÓN
DE BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA
ESTABILIZADA CON MATERIALES DE SÍLICE
DE DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Miguel Carcedo Fernández

2012

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica

Máster en Innovación Tecnológica en la Edificación

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**RESISTENCIA A COMPRESIÓN
DE BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA
ESTABILIZADA CON MATERIALES DE SÍLICE
DE DIFERENTE TAMAÑO DE PARTÍCULA**

Autor

Miguel Carcedo Fernández

Director

Mariano González Cortina

Subdirección de Investigación, Doctorado y Postgrado

2012

Resumen

Los bloques de tierra comprimida (BTC) están actualmente siendo estudiados en gran parte del mundo con diferentes estabilizantes para mejorar diversas de sus características. Esta situación es debida a la importancia que la tierra cruda tiene en el planeta como material de construcción. Su fácil disponibilidad, bajo coste e inercia térmica hacen de la tierra una materia prima fundamental para las viviendas de ciertas poblaciones en el mundo.

El objetivo fundamental del presente Trabajo Fin de Máster es determinar si existe una relación del tamaño de partícula del material que aporta la sílice en relación a la reacción química con la cal hidratada para el aumento de la resistencia a compresión de los BTC.

Para la diferenciación de los tamaños de partícula de sílice en este estudio se ha utilizado arcilla como componente control de las probetas ensayadas y una pequeña cantidad de nanosílice para comparar con las probetas sin este nanomaterial y determinar así la influencia del tamaño de partícula.

Así mismo se han ensayado otros tipos de probetas para confirmar la influencia de la compactación mecánica en los BTC y de la cantidad de agua para considerar un equilibrio entre la resistencia y la trabajabilidad de los BTC.

Durante la redacción del trabajo se repasará la importancia comentada de la tierra cruda en la construcción mundial y las principales técnicas que la han usado a lo largo de la historia para sentar las bases de los BTC actuales. También se comentarán y valorarán en lo relativo a los estabilizantes y la resistencia a compresión una serie de investigaciones publicadas con aspectos semejantes a los tratados en este estudio.

A continuación se procederá a una explicación de los métodos ejercidos para los ensayos de las probetas de BTC correspondientes a este trabajo para más tarde realizar una discusión de los resultados obtenidos. Con todo ello se establecerán unas conclusiones en lo referente a los objetivos del trabajo.

Abstract

Nowadays, the compressed earth blocks (CEB) are being studied in the most of world with different stabilizers to improve some of their skills. This situation is due to the importance that the unfired earth has in a large area of the world as material for construction. Its easy availability, low cost and thermal inertia of the earth are an essential raw material for the houses of certain population in the world.

The main aim of this Ending Master's Work is to determine whether there is correlation between the particle size of the material which provide the silica in chemical reactions with hydrated lime and the increasing of the compressive strength of CEB.

For the differentiation of the silica particle size in this study has been used clay as component of control for the specimens tested and a small amount of nanosilica to compare with the samples without this nanomaterial and thus determine the influence of particle size.

Also, other types of specimens have been tested to confirm the influence of mechanical compaction in the CEB and the amount of water to consider a balance between resistance and workability of the CEB.

During the writing of the work will review the importance of unfired earth already mentioned in the global construction and the main techniques that have been used it throughout history to lay the foundations for the current CEB. Also be discussed and evaluated in terms of stabilizers and the compressive strength a number of published research with aspects similar to those discussed in this study.

Then an explanation will be given about the methods followed for testing specimens of CEB for this work to make a discussion of the results later. With all, conclusions will be established regarding the aims of the work.

Índice general

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Índice General.....	iii
Siglas.....	v
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	4
3. Antecedentes.....	5
3.1. La arquitectura con tierra.....	5
3.2. Técnicas Constructivas con tierra.....	10
3.2.1. El tapial.....	10
3.2.2. El adobe.....	11
3.2.3. El BTC.....	11
3.2.4. Otras técnicas.....	13
3.3. Situación de la normativa.....	15
3.4. Materiales componentes de los BTC.....	21
3.4.1. Tierra.....	21
3.4.2. Arcilla.....	23
3.4.3. Estabilizantes.....	25
3.4.4. Agua.....	25
3.5. Otros componentes de este trabajo.....	26
3.5.1. Cal hidratada.....	28
3.5.2. Nanosílice.....	30
3.6. Experimentación.....	32
3.7. Conclusiones de antecedentes.....	40
4. Metodología.....	42
4.1. Consideraciones previas.....	42
4.2. Materiales y equipos.....	43
4.3. Composición.....	44
4.4. Análisis granulométrico del árido.....	51
4.5. Fabricación de las probetas.....	53

5. Resultados y discusión.....	57
5.1. Procedimiento de medición.....	57
5.2. Procedimiento de ensayo.....	59
5.3. Análisis de los resultados.....	62
6. Conclusiones.....	67
7. Futuras líneas de investigación.....	69
Agradecimientos.....	70
Bibliografía.....	71
Anexos.....	77
Anexo 1. Ficha técnica de la cal hidratada	
Anexo 2. Fichas técnica y de seguridad de la nanosílice	
Anexo 3. Análisis granulométrico del árido.	

Siglas

BTC: Bloque de tierra comprimida

CEB: Compressed Earth Block

C-H-S: Silicatos de calcio hidratados

MPa: Megapascal

$Q_{\text{máx}}$: Carga máxima

$R_{\text{máx}}$: Resistencia máxima

Def. : Deformación

1. Introducción

La arquitectura tradicional con tierra todavía está presente en una gran parte del mundo. No sólo a lo largo de la historia ha sido una de las arquitecturas más populares del planeta, sino que en nuestros días sigue jugando un papel fundamental en la sociedad actual.

La tierra sigue siendo el principal componente de construcción en las poblaciones con recursos económicos precarios, ya que es un material de fácil acceso, ilimitado y de eficiencia altamente contrastada. Este tipo de arquitectura es fundamental para las sociedades que levantan sus viviendas mediante la autoconstrucción. Por ello, aparte de ser un factor económico fundamental para ellos, se convierte en un importante factor social y clave a la hora de hablar de su papel en la vida de estas poblaciones.

Además las propiedades de la tierra en los cerramientos de estas casas se vuelven imprescindibles para las familias que viven en su interior. Primeramente, su inercia térmica hace que en climas poco extremos sea innecesaria una instalación de calefacción o refrigeración, originando una de las claves para usarse en la construcción de sociedades de escasos recursos.

Por otro lado, su resistencia mecánica le confiere unas características suficientes para viviendas de una o dos plantas, siempre que no haya límites establecidos para el grosor de sus muros, condición que se cumple fácilmente en los territorios donde estas poblaciones levantan sus casas.

Profundizando en las consecuencias de la construcción con tierra, se puede decir abiertamente que favorece la sostenibilidad del medio, ya que es un material que no necesita energía de combustibles para su extracción, implementación o destrucción. Por este aspecto principalmente la tierra se convierte a su vez en un factor ecológico.

Así pues, la tierra es un producto que basa su puesta en obra en el cumplimiento de las tres patas que sostienen una construcción sostenible: el aspecto económico, el social y el ecológico.

Por ello no es de extrañar que los últimos años haya existido un interés creciente por este material a la hora de investigar en innovación tecnológica actual. Numerosos estudios han sido expuestos y publicados hasta ahora sobre la tierra como material sostenible de construcción.

Sin embargo, no sólo se dedican estas investigaciones a los productos que antiguamente se usaban para construir: adobe y tapial entre ellos. Un producto que está cobrando una fuerza cada vez mayor, tanto en el estudio como en el mercado, es el bloque de tierra comprimida.

El bloque de tierra comprimida (BTC) consiste en una pieza manufacturada con tierra en un molde y comprimida dentro del mismo. Esta compresión implica un aumento de la densidad del bloque, lo que le confiere mejores capacidades mecánicas, una de las características limitadas de las construcciones tradicionales con tierra.

No obstante queda mucho camino en la investigación de la tierra como material de construcción, ya que las características de la tierra le confieren a sus cerramientos perjuicios en dos aspectos principales: ante las inclemencias del agua y ante los terremotos. Hay que recordar que casi toda la concentración de construcciones de tierra en el mundo está en zonas climáticas tropicales y en zonas dependientes de los movimientos de las placas tectónicas.

Muchas combinaciones de materias primas están siendo analizadas para ralentizar la corrosión de las piezas ante el agua y muchos tipos de estructuras están siendo usadas para observar sus mejoras ante la posibilidad de terremotos.

Sin embargo en esta investigación se va a analizar únicamente las características de la tierra como material de construcción ante esfuerzos de

compresión, con una variedad de estabilizantes y proporciones para comprobar su idoneidad y posibles mejoras.

2. Objetivos

Los objetivos de este Trabajo Fin de Máster están orientados a evaluar la resistencia a compresión de los bloques de tierra comprimida con el fin de mejorar esta capacidad desde los siguientes puntos de vista:

2.1. Influencia del tamaño de partícula de sílice

La sílice que reacciona con la cal forma moléculas C-S-H que aportan resistencia a la mezcla de tierra. Se quiere comprobar si la superficie de reacción de las partículas de sílice, determinadas por el tamaño de las mismas, interviene aumentando la resistencia a compresión del bloque al disminuir el diámetro de partícula.

2.2. Influencia de la compactación de los bloques de tierra

Un factor que aumenta la resistencia en los BTC es la compresión de la tierra dentro del molde. En este trabajo se comparará la resistencia a compresión de bloques de tierra comprimidos a mano y en prensa, para comprobar la influencia de su densidad.

2.3. Valoración de los estabilizantes usados

Se realizará una valoración cualitativa de los materiales usados como estabilizantes en este trabajo: cal, arcilla y nanosílice, en lo relativo a su aportación para mejorar la resistencia a compresión de los BTC.

3. Antecedentes

En este capítulo se van a tratar los temas referentes a la arquitectura con tierra y la investigación que ha habido hasta el momento en este campo, principalmente relacionada a lo investigado en este trabajo.

3.1. La arquitectura con tierra

La arquitectura con tierra ha sido un arte tradicional a lo largo de la historia de la humanidad. El adobe mismo es una de los materiales de construcción más antiguos. Su uso se remonta al año 8000 antes de Cristo [1], cuando civilizaciones en expansión, como la Mesopotámica o la Egipcia ya construían con este material. Sin embargo, las primeras aglomeraciones urbanas construidas con tierra de las que tenemos vestigios son las de la ciudad de Jericó [2]. Desde este primer ejemplo, durante milenios la tierra ha sido la principal materia prima para la construcción de casas.

Es más, desde los más tempranos días de la humanidad el barro ya era utilizado como material de construcción, formando con él barreras a la entrada de sus cuevas para protegerlas de algunos fenómenos meteorológicos y de ciertos animales [3]. La tierra ha sido el material más usado en la construcción casi independientemente del lugar o el tiempo. Este hecho es evidentemente plausible debido a su facilidad de extracción e ilimitación del recurso.

La humanidad se familiarizó con la tierra y sus propiedades constructivas y poco a poco encontraron materiales con los que unirla para mejorar sus características. Su adición ha estado enfocada a aumentar su resistencia a la intemperie, su resistencia mecánica y su manejabilidad para facilitar su uso. Ejemplos de ello son el uso de fibras, como la paja, la cáscara de arroz o la hierba, o de estabilizantes naturales, como la ceniza, el estiércol o la resina de los árboles. También hay que mencionar la adición de otros productos para cambiar las proporciones de los componentes de la tierra, como la arena o la arcilla.

La arquitectura popular es el resultado de un proceso colectivo de creación en el que no pueden existir hechos individuales reconocidos. Es una arte de construcción autóctono que ha utilizado los materiales de la zona para tener de ellos, con el paso del tiempo y la acción comunitaria, la mayor eficiencia constructiva que queda arraigada en las raíces de la cultura local [4].

Sin embargo, pronto quedó relegada a un material de importancia secundaria cuando la piedra empezó a imponerse en las construcciones importantes para la sociedad, sobre todo edificios públicos y religiosos.

Las primeras construcciones con piedra en Mesopotamia datan hacia el año 3000 a. C., aunque toscamente labrada y poco expandida, ya que era una zona de poca piedra con buenas características constructivas. La primera pirámide escalonada egipcia fue construida por Imhotep para el rey Zoser alrededor del 2760 a. C. La cultura griega fue mucho más activa con la construcción con piedra. Sus primeras obras son los palacios cretenses hacia el 2000 a. C. [5].

No obstante, es un hecho ineludible que no sólo contra la piedra, la tierra ha quedado relegada a papeles menos elitistas. Siempre ha existido un rechazo cultural hacia su arquitectura debido a su relación con la pobreza, el movimiento por el triunfo del progreso o el repudio continuo a la tradición [6]. En los últimos siglos la aparición del acero y el hormigón como materiales de construcción han sido objeto de deseo para ejecutar altas torres y extensas y complejas edificaciones. Es irrefutable que el uso de estas materias para este tipo de construcciones es beneficioso, pero la idea de su utilización en casas modestas está anclada por los factores antes mencionados, cuando su ejecución con tierra podría ser de mayor rentabilidad.

El proceso de desaparición de la arquitectura popular, en la cual está inmersa la arquitectura con tierra, ha sufrido una fuerte aceleración en las últimas décadas debido a su inactividad económica y a la despoblación de las zonas rurales, lugares en los que era más factible este tipo de construcciones [4]. Incluso las nuevas tecnologías llegan a las propias zonas rurales, perdiendo su identificación con el medio y su mimetismo con el entorno natural.

Afortunadamente, organizaciones públicas y privadas están cobrando conciencia del papel de la tierra en la arquitectura moderna. Es fundamental el apoyo que países ricos como Estados Unidos o Australia están aportando a esta arquitectura con su tecnología, siendo países de climas cálidos. Son lugares en los que la venta de bloques de tierra comprimida de diversos tipos y composiciones está creando una red muy sólida en un campo en el que Europa todavía considera insólita [6].

Ampliando la información sobre las características de la tierra como material de construcción, se podrían comentar como primeros factores su fácil y amplia disponibilidad, el bajo coste que requiere y su facilidad de ejecución, sin necesidad de equipos sofisticados. También cabe mencionar que su aspecto tradicionalista hace que la gente aprenda de las costumbres de toda la vida cómo construir con tierra, por lo que ya están desde pequeños enseñados y concienciados con la labor; este punto es importante a la hora de hablar de autoconstrucción, lo que significa que las personas puedan construir su propia casa [2].

Las casas construidas con tierra ofrecen otras ventajas significativas, como su confortabilidad térmica, ya que por sus propiedades y el espesor de sus muros, su inercia térmica hace que la temperatura dentro de las casas sea más estable y regular durante el día y la noche. Además tienen un factor estético importante, fundiéndose con el paisaje donde han sido construidas, lo que beneficia su incorporación al entorno [3].

Sin embargo, la tierra también tiene ciertas desventajas, dos de ellas son importantes. La primera es su comportamiento ante el agua. La tierra es un material higrófilo, por lo que tiende a absorber el agua del aire atmosférico, aumentando su degradación y disminuyendo su durabilidad. Por ello los muros deben ser rehabilitados anualmente con una capa de barro, recuperando lo perdido. La segunda es sus escasas resistencias mecánicas comparándola con otros materiales de construcción, ya que es un material que no está tratado ni térmica ni químicamente; simplemente ha cambiado la forma natural en que

se presentaba [3]. En realidad, a tracción su resistencia es prácticamente nula, de ahí la inclusión de fibras en ella.

Respecto a la degradación con el agua, se da de tres maneras diferentes, dependiendo de las reacciones químicas que se produzcan [4]. La primera es por disolución, que es un proceso que consiste en la disociación de las moléculas en iones gracias a un agente disolvente, el agua. Sin transformaciones en la composición química, una vez disueltos los materiales se precipitan al desaparecer el agente disolvente. Tras la disolución aparecen residuos insolubles, como la arena y la arcilla.

El segundo modo es por hidratación, que afecta a algunos minerales, especialmente a las rocas de metamorfismo débil compuestas por silicatos aluminicos, que al hidratarse se transforman en arcillas, más sensibles a los agentes erosivos. Por último, mediante hidrólisis, que consiste en el desdoblamiento de una molécula en presencia del agua. La consecuencia es la destrucción de los cristales, dando lugar a la progresiva separación y lavado de la sílice y otros elementos que componga la tierra.

Por otro lado, volviendo a la debilidad ante los terremotos, se comentaba la resistencia casi nula a tracción. Esta falta de resistencia desemboca en un perjuicio importante para ciertas zonas del mundo donde es mayoritario su uso: la fragilidad ante los movimientos sísmicos. Las estructuras de tierra son vulnerables a los efectos de los terremotos porque sus escasas características mecánicas, unidas a su gran peso, originan daños en las mismas y puede conllevar un colapso [1]. Técnicamente, la poca resistencia a tracción produce el fallo en el enjarje de las esquinas de los muros, empezando por la parte superior, lo que deja a la zona interior de los mismos aislada, lo que conduce a una pérdida de estabilidad, provocando la posibilidad de desplome [8].

Las localidades que se ven amenazadas por los sismos son en muchos casos poblaciones pobres, cuyo único recurso para construir es la tierra, por lo que el problema se acrecienta. Existen muchas investigaciones sobre estructuras solidarias con el barro para mejorar su comportamiento, como la caña o el

bambú, sobre todo en Perú, país principalmente afectado por esta situación [8]. Sin embargo su implementación se desarrolla de forma precaria, por lo que no se muestran como un avance.

No sólo en Perú ocurre esta situación. Alrededor de un tercio de la población mundial vive en construcciones de tierra [1, 2, 10], y la mitad de la población que reside en países en desarrollo [1]. Latinoamérica, África y países en vías de desarrollo como la India tienen un alto nivel de viviendas de tierra. La necesidad de espacios construidos por parte de amplios sectores de población que nunca serán solvente para optar a otro tipo de solución constructiva es la razón para que se siga construyendo con tierra tan masivamente [10].

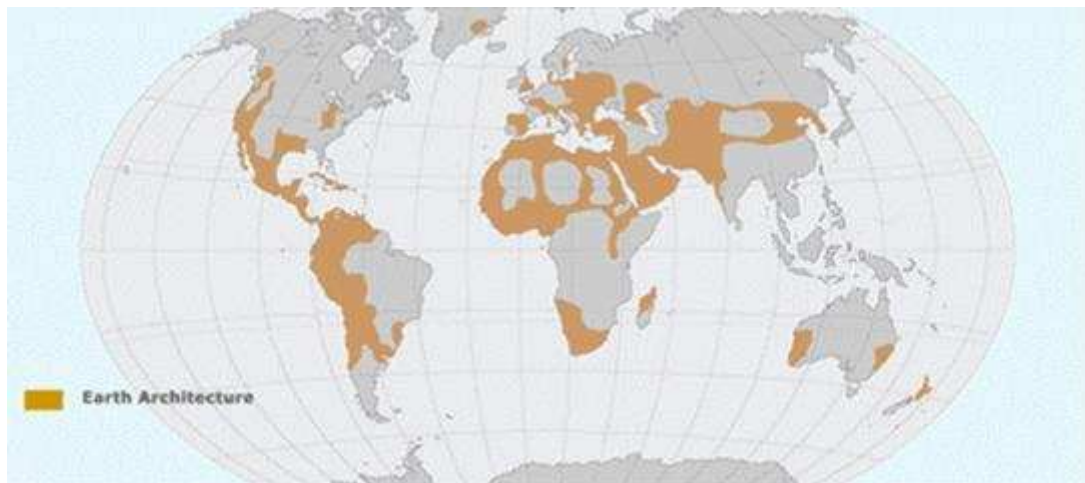


Fig. 3.1. Distribución mundial de arquitectura de adobe. [1]



Fig. 3.2. Distribución mundial de riesgo sísmico moderado y alto. [1]

En las figuras 3.1 y 3.2 se pueden comparar las zonas mundiales de mayor uso de casas de tierra con las zonas sísmicas principales. La correlación es evidente.

La escasa industria que desarrolla la tecnología de la tierra es una limitación para el avance de sus técnicas. En el campo de la investigación cada vez más teóricos estudian las propiedades de la tierra con nuevos componentes y estructuras para adaptar esta arquitectura a la era moderna y cubrir las necesidades de sus usuarios. Poco a poco se observa un aumento en la política social que reivindica la tierra como material constructivo disponible y eficiente [7].

3.2. Técnicas constructivas con tierra

En este apartado serán resumidas las técnicas más usadas en el mundo para la construcción con tierra. También se mencionarán algunas de las técnicas locales tradicionales que siguen activas en la actualidad.

3.2.1. El tapial

La técnica del tapial se define como tierra amasada y apisonada en un encofrado para formar muros monolíticos [11]. Para su construcción se emplea un molde de madera a modo de encofrado. La tierra se vierte dentro del molde y se compacta por tongadas con un pisón. Puede llevar fibras para evitar la poca retracción y aumentar la resistencia a tracción. También se echan piedras para aumentar su resistencia a compresión. Otras veces se mezcla la tierra con arena para aumentar su fluidez o cal para mejorar sus características mecánicas. La composición final depende de los componentes originales de la tierra. Una vez acabado el muro, se desencofra y se deja secar al sol. Cuando esté seco, se puede construir sobre él para hacer el tejado o un segundo piso.

En la figura 3.3 se ofrece una tabla con los datos numéricos de algunas de las características del tapial, datos que han sido una reunión de diferentes estudios.

Características del material	
Contenido inicial de humedad	8,20%
Retracción	0,15%
Resistencia a compresión	3,2 N/mm ²
Módulo de elasticidad	650 N/mm ²
Resistencia a flexión	0,63 N/mm ²
Resistencia a cortante	0,79 N/mm ²

Fig. 3.3. Características del tapial. [11]

La resistencia a compresión es baja, pero es efectiva para un amplio sector de la población mundial, como se ha mencionado anteriormente, que vive en casas modestas.

3.2.2. El adobe

El adobe es una pieza maciza de barro sin cocer. Las dimensiones de la pieza varían entre 30 y 40 centímetros de largo y corresponde a una relación usual de 1:1/2:1/4 respecto a la dimensión mayor [12]. Se basa como el tapial en tierra compactada a mano en moldes. Sin embargo, la técnica no implica moldear la tierra in situ, es decir, en el lugar donde se va a levantar el muro, sino que se moldea por piezas de forma prismática. Para su moldeo se necesita una plasticidad mayor, por lo que el contenido de arcilla suele ser mayor. A su vez, dado que el secado de piezas de barro más pequeñas se desecan en mayor medida, necesitan más cantidad de agua, por lo que la retracción también es mayor, obligando la presencia de fibras en cantidad suficiente [11].

El desecado de los adobes es aconsejable hacerlo a la sombra y con corriente de aire, para minimizar la retracción. Una vez desmoldados y secos, los adobes se colocan para formar el muro como piezas de fábrica con un mortero entre filas, basado también en el mismo barro pero más fluido.

3.2.3. El BTC

Como se ha comentado al inicio de este trabajo, BTC son las siglas para bloque de tierra comprimida. Como el adobe, son piezas prismáticas de tierra que se fabrican con moldes. Sin embargo, la principal característica del BTC es que la tierra es comprimida dentro del molde, aumentando su compacidad y así, su resistencia mecánica. La mezcla suele llevar estabilizantes como cal o cemento [11]. Suelen ser más pequeños que el adobe, pero el sistema de construcción posterior es idéntico.

Otra diferencia es que, para que la compactación sea óptima, obliga que la tierra carezca de áridos superiores a 20 mm. Y debe contener finos y limos en proporciones suficientes [13]. Además, la capa vegetal del suelo, que no es aconsejable para la construcción con tierra en general, es especialmente intolerable en los BTC, ya que su descomposición dejaría huecos que no deberían existir.

Como ejemplos ilustrativos está la figura 3.4, que muestra, de izquierda a derecha: muros de tapial en la biblioteca Sublette County, Pinedale, Wyoming, EE. UU.; muros y cubierta de BTC en la sala polivalente de la Escuela Deepanam, Auroville, India; muros de adobe y aberturas con celosías para la asociación Yeredemé, Mopti, Mali.



Fig. 3.4. Edificios con las principales técnicas. [11]

Debajo, la figura 3.5 muestra una gran selección de características de los BTC. Entre ellas está la resistencia a compresión, valor que será comparado en este trabajo con la experimentación propia.

Propiedades	Unidad	clase A	clase B
resistencia a compresión a los 28 días	N/mm ²	5-7	2-5
resistencia a tracción a los 28 días	N/mm ²	1-2	0,5-1
resistencia a flexión a los 28 días	N/mm ²	1-2	0,5-1
resistencia a cortante a los 28 días	N/mm ²	1-2	0,5-1
módulo de Young	N/mm ²	700-1000	
densidad aparente	Kg/m ³	1900-2200	1700-2000
coeficiente de expansividad térmica	mm/m°C	0,010-0,015	
hinchamiento tras inmersión 24 horas	mm/m°C	0,5-1	1-2
retracción por secado	mm/m°C	0.2-1	0,2-1
permeabilidad	mm/sec	1,10 ⁻⁵	
absorción de agua total	% del peso	5 - 10	10 - 20
calor específico	KJ/Kg	0,85	0,65-0,85
coeficiente de conductividad térmica	W/m°C	0,46-0,81	0,81-0,93
coeficiente de transmisión de vapor	%	5-10	10-30
desfase térmico	horas	10-12	5-10
aislamiento acústico muros de 40 cm	dB	50	40

Fig. 3.5. Características de los BTC. [11]

3.2.4. Otras técnicas

En el mundo existen muchas otras técnicas de construcción con tierra. Dependiendo de la cultura y las necesidades sociales y climáticas, muchas variantes han sido desarrolladas en el planeta. Estas son ejemplo de algunas:

El Cob. Consiste en una masa de barro y abundante paja que se apila y se moldea a mano para formar muros monolíticos. El moldeado se realiza directamente en el muro sin encofrado. Es un sistema tradicional en el sudeste del Reino Unido. Contiene una alta proporción de arcilla, lo que normalmente da lugar a retracciones excesivas [11].

La Kutcha. Es una casa tradicional de Bangladés, que se puede encontrar en los pueblos y las áreas suburbanas a lo largo de todo el país. Alrededor del 74% de la población vive en este tipo de casas. Aunque las paredes son de

barro y paja, puede llevar madera en su estructura y tener tejados de chapas onduladas [14].

El Bhonga. Se encuentra entre las viviendas tradicionales de las zonas rurales de India. Son casas de una única habitación de entre 3 y 6 metros de diámetro, que están hechas con muros de tierra cilíndricos y un tejado cónico de paja. Los muros se suelen hacer con piezas como adobes y mortero de barro [15].

Nyumba Ya Zidina. Es un tipo de construcción tanto en zonas rurales como urbanas de Malawi. Se estima que el 45% de las edificaciones del país son realizadas con esta técnica. Se trata de ladrillos de barro no cocidos y mortero de barro que se levantan sobre un pie de piedra y están cubiertas de un techo de paja [16].

La figura 3.6 recoge unas ilustraciones de estos tipos de construcciones, de izquierda a derecha primero las de arriba: muros de Cob en el Pabellón de Servicios del Eden Project, Cornwall, Reino Unido; Kutcha típica con tejado de estaño en Muktagacha, Mymensingh, Bangladesh; Bhonga revestido en Kutch, Gujarat, India; Nyumba Ya Zidina en construcción en algún lugar de Mali.

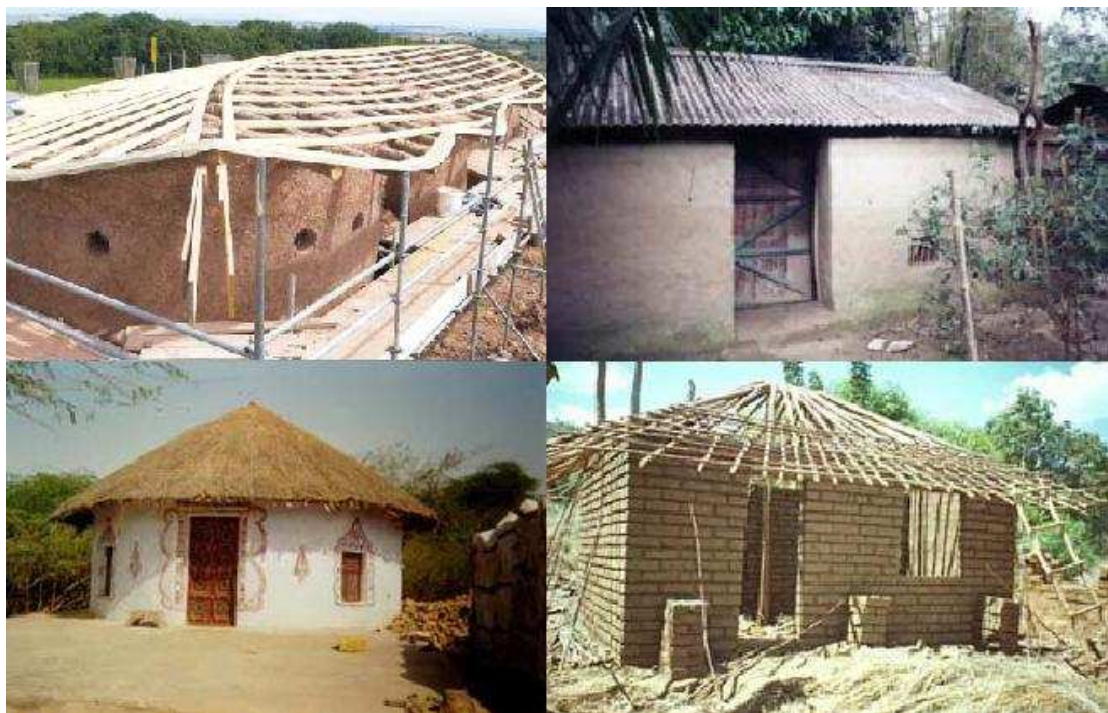


Fig. 3.6. Edificios con otras técnicas. [11, 14, 15, 16]

A continuación, en la figura 3.7 se expone un cuadro comparativo con las resistencias a compresión de algunas de las técnicas mencionadas en este apartado.

material	densidad	resistencia a compresión
adobe	1200 - 1500 kg/m ³	0,53 - 1,72 N/mm ²
cob	1615 kg/m ³	1 N/mm ²
btc (tierra comprimida)	1700 - 2000 kg/m ³	1 - 5 N/mm ²
btc estabilizado	1787,5 kg/m ³	10,8 N/mm ²
tapial	1900 - 2200 kg/m ³	3 - 4 N/mm ²

Fig. 3.7. Resistencias a compresión de varias técnicas [11]

3.3. Situación de la normativa

La normativa en lo referente a la construcción con tierra está por lo general muy desarrollada en el mundo. Contados países son los pioneros en establecer guías de buena construcción, límites de resistencia, proporciones de componentes, etc.

En España hasta hace poco no existía nada acerca de ello. Fue en 2008 cuando salió la UNE 41410, de bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Esta norma tiene por objeto definir los BTC usados en fábricas de albañilería [17]. Básicamente fija las prestaciones que deben cumplir los bloques y los ensayos que hay que realizar para determinarlas.

Esta norma define el BTC como: pieza para fábrica de albañilería generalmente con forma de paralelepípedo rectangular, obtenida por compresión estática o dinámica de tierra húmeda, seguida de un desmolde inmediato y que puede contener estabilizantes o aditivos para alcanzar o desarrollar las características particulares de los productos.

La norma crea indirectamente una orientación para empezar a desarrollar investigaciones en su campo, ya que da una serie de guías respecto a lo que

los fabricantes de BTC debe declarar en el producto, así como unas recomendaciones de composición y una lista de estabilizantes de diversa índole en su anexo C.

Merece la pena comentar las recomendaciones que la norma indica, ya que es la que atañe a los BTC en España. En primer lugar habla de los componentes de la tierra empleada: grava, arena, limo y arcilla, mezclados con agua y opcionalmente con estabilizantes y otros aditivos. Ofrece un cuadro orientativo con la granulometría de los áridos que conforman la tierra, en el que destaca la inclusión de gravas con tamaño máximo de 20 milímetros y un alto contenido de limos (hasta un 30%). A continuación se muestra el cuadro de la norma en la figura 3.8.

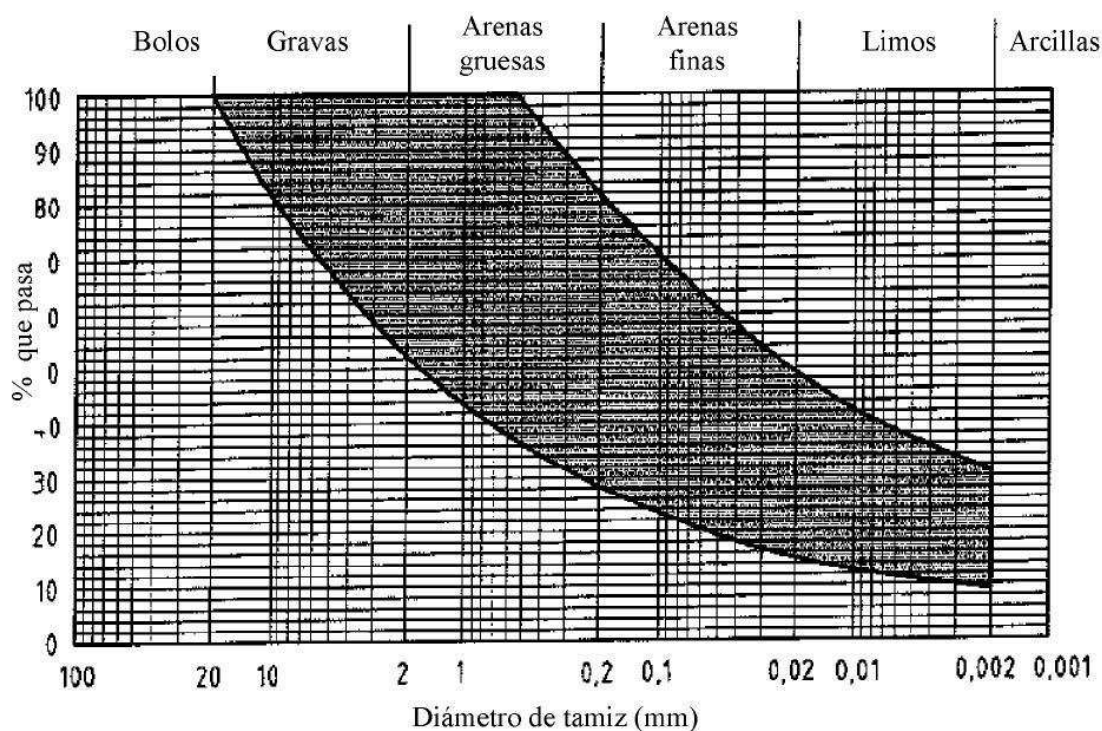


Fig. 3.8. Granulometría recomendada. [17]

Asimismo, se aconseja también un nivel de plasticidad: dentro de la zona sombreada de la figura 3.9.

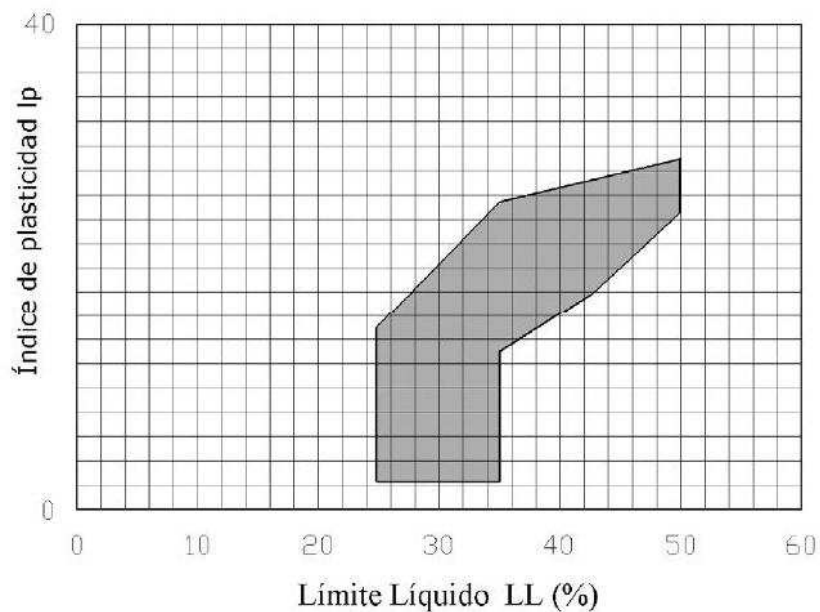


Fig. 3.9. Plasticidad recomendada. [17]

Después, en los anexos describe propiedades interesantes para los BTC. Por ejemplo, la acción de los sulfatos es negativa y deriva del uso del cemento Portland como estabilizante o como mortero de unión. Así, establece un contenido máximo de sulfatos en las piezas.

Por otro lado, pasando directamente al anexo C, se informa de unos criterios de elección de los materiales basados en razones de sostenibilidad: disponibilidad regional, ciclo de vida, puesta en obra, mantenimiento y economía. No obstante lo interesante es el listado de estabilizantes que aporta después, según el tipo de estabilización:

- Química: aceites naturales (coco, savia de caucho, savias naturales, látex, prensado de oliva,...), silicatos de sosa y orina, cal viva o apagada, resinas acrílicas, etilsilicatos, yema de huevo, productos puzolánicos, cementos, yesos, resinas.
- Física: combinación de suelos.
- Mecánica: aumentando la compacidad.
- Mediante fibras: creando un armazón interno.

Con ello da bastantes ideas sobre dónde empezar para elegir un estabilizante para investigar o fabricar. En este trabajo se han desarrollado probetas con cal y productos basados en la sílice.

En legislación europea, la única directiva que puede tener que ver con las piezas de tierra para construcción es la 89/106/CEE de diciembre de 1988, sobre los productos de construcción. Así con ella se podrían establecer, al igual que el resto de productos, unas directrices sobre los requisitos que deben cumplir.

La directiva establece disposiciones relativas a la seguridad en la construcción, a la salud, el ahorro de energía, protección del medio ambiente, aspectos de la economía y otros aspectos importantes de interés público [18]. Establece unos requisitos esenciales que constituyen la base para las normas de cada Estado y tienen como fin lograr un beneficio para el mercado interior y garantizar su cumplimiento en los productos de construcción.

Así, los requisitos esenciales aplicables están en el anexo I de la directiva, que, esquematizados son:

1. Resistencia mecánica y estabilidad
2. Seguridad en caso de incendio
3. Higiene, salud y medio ambiente
4. Seguridad de utilización
5. Protección contra el ruido
6. Ahorro de energía y aislamiento térmico

Con las guías aportadas en la directiva europea 89/106 de 1988 se constituyó la norma española UNE 41410:2008.

En cuanto a las normativas internacionales, quizá la más destacable sea la norma peruana E.080:2006, por ser una de las normas más usadas como guía para la construcción popular con tierra en zonas de riesgo sísmico. Es también de los documentos legislativos más nombrados en las investigaciones sobre

construcción con tierra, quizás por ser de las normas que más datos dan y más precisas son.

La norma comprende lo referente al adobe, tanto simple como estabilizado, como unidad de albañilería para la construcción, estableciendo sus características, comportamiento y diseño. Su objetivo es hacer posible proyectar edificaciones de interés social y bajo coste que resistan acciones sísmicas, evitando su colapso [19].

Primero de todo, diferencia tres zonas sísmicas para organizar tablas y exigencias. Sin embargo, atendiendo a lo interesante para este trabajo, determina unos valores límite para los componentes del adobe: arcilla: 10-20%, limo: 15-25% y arena: 55-70%, no debiéndose usar material orgánico para su producción. Indica también una proporción entre dimensiones de 1:1/2:1/4, un tamaño de árido máximo de 5 mm y secado a la sombra.

Después, constituyendo la mayoría de las recomendaciones de la norma, describe procesos constructivos para paliar los efectos de los movimientos sísmicos en las casas hechas de adobe.

En el área internacional, muchas otras normativas describen procesos semejantes y establecen valores mínimos de resistencia e intervalos de proporciones en sus componentes. Más adelante se comentarán estos datos. Por ahora sólo ilustrar la normativa internacional con la figura: 3.10, que muestra toda la normativa ordenada cronológicamente y diferenciada por países [20].

Como puede observarse, es muy poca legislación para un material de construcción tan extendido en el planeta. Es necesaria la redacción de normativas claras y concisas en cada país para impulsar el comercio de los productos de tierra, y del BTC especialmente, y garantizar una calidad al consumidor.

Año	País	Norma	REF
1979	Perú	NTP 331.201,331.202,331.203	36-38
1980	India	IS 2110	25
1982	India	IS 1725	26
1985	Turquía	TS 537, TS 2514, TS 2515	58-60
1986	Brasil	NBR 8491, 8492	7-8
1989	Brasil	NBR 10832,10833	9-10
1990	Brasil	NBR 12025	16
1992	Brasil	NBR 12023,12024	14-15
1993	India	IS 13827 : 1993	27
1994	Brasil	NBR 10834,10835,10836	11-13
1996	Brasil	NBR 13554,13555,13553	17-19
	Regional África	ARS 670-683	39-52
	Túnez	NT 21.33, 21.35	56-57
1997	Nigeria	NIS 369	31
1998	Nueva Zelanda	NZS 4297, 4298	32-33
1999	Nueva Zelanda	NZS 4299	34
	Kenya	KS 02-1070	30
2000	Perú	NTE E 0.80	35
2001	Francia	XP P13-901	24
	Zimbabue	SAZS 724	61
2004	Colombia	NTC 5324	20
	EEUU	NMAC, 14.7.4	21
	Italia	Ley nº 378, 2004	28
2006	Italia	L.R. 2/06	29
2008	España	UNE 41410	23
2009	Sri Lanka	SLS 1382-1, 1382-2, 1382-3,	53-55
2010	EEUU	ASTM E2392 M-10	61

Fig. 3.10. Normativa mundial vigente. [20]

En España esta situación empezó a plantearse hace algunos años para incrementar la construcción con tierra en el país, llegando a la conclusión que necesitaba una normativa, ya que la mayor dificultad para un producto así es

que no podía estar normalizado por ningún documento, lo que dificultaba su uso, principalmente frente a técnicos y aseguradoras [21]. De esta manera, no se comercializaba el barro porque no había normativa y no se quería establecer una normativa para un producto que no existía. Se estaba entrando en un círculo vicioso.

No obstante, en 2008 se dio un paso para el mercado del BTC saliendo a la luz la norma UNE 41410, descrita anteriormente, y aunque no precisa datos claros para los requisitos de un BTC, sí establece al menos los detalles que deben declarar los comerciantes, y cómo deben determinarlos, para que el cliente pueda cerciorarse de lo que está comprando.

Las futuras líneas de investigación para la norma son el adobe y el tapial, desarrollando documentos con procedimientos de construcción y mecanismos de control para evolucionar la edificación con tierra y aumentar su implantación en España como comercio con garantía.

De hecho se está viendo un importante incremento en las investigaciones concernientes a los productos de tierra, lo que puede acelerar el proceso de normalización en la Comunidad Europea y el resto de países del mundo. Sin embargo queda mucho camino para el BTC o el adobe tengan un mercado tan estable y regulado como los demás productos de construcción.

3.4. Materiales componentes de los BTC

En este apartado se van a describir las propiedades que tienen los materiales generalmente utilizados en la confección de los BTC y su relevancia en los mismos. Los materiales en cuestión son los siguientes: tierra, arcilla, estabilizantes y agua.

3.4.1. Tierra

La tierra es el principal componente de los BTC. Es el elemento que da cuerpo y solidez al bloque. Está compuesta básicamente por áridos, limos y arcilla, sin

embargo la arcilla será estudiada en un apartado diferente a éste. Los áridos y los limos conforman el esqueleto resistente que soportan las cargas y evitan la fisuración [22]. La variedad en su granulometría le confiere distintas propiedades, dependiendo de la cantidad de gruesos, finos y limos.

Es fácilmente extraíble, simplemente recogiendo del suelo. De todos modos, no todos los suelos son igual de aptos para formar productos de construcción basados en la tierra. Se deben desechar la capa superficial que contiene elementos orgánicos. A partir de unos 30 centímetros de profundidad suele ser tierra apta para bloques [22].

La granulometría del árido de la tierra también es importante a la hora de elegir suelo. La combinación óptima de la misma según varias fuentes [23] es generalmente un contenido de 10-25% de limos, 40-70% de arena y la regla general es no incluir grava. Si la mezcla tiene un exceso de arena se disgregará y no tendrá cohesión para resistir esfuerzos, mientras que si tiene escasez, tampoco soportará cargas debido a su falta de cuerpo.

La plasticidad también es importante ya que debe estar moldeable en presencia de agua, pero sin disgregarse cuando ésta desaparezca. La plasticidad depende en gran medida de la arcilla que incorpore el suelo, pero se podría decir que el índice de plasticidad debería ser entre 16 y 28 y límite líquido entre 32 y 46 [23], en referencia a los ensayos según normativa. Si la mezcla es muy fluida perderá resistencia mecánica, mientras que si es muy seca no será maleable y no obtendrá la cohesión necesaria.

Otra de las razones por las que la tierra es elegida como material de construcción para los cerramientos es su inercia térmica. La inercia térmica es la resistencia que presenta todo cuerpo a variar su temperatura, acumulando en su interior la energía térmica que reciben. La variable que expresa esta propiedad en los materiales es la difusividad térmica y depende del coeficiente de conductividad térmica, el calor específico y la densidad. La difusividad térmica de la tierra es $4,62 \times 10^{-7}$ [24]. Los cerramientos con alta inercia térmica, conseguidos con grandes espesores de materiales de baja difusividad térmica

tardan un tiempo mayor en adquirir o desprender el calor, por lo que sus calentamientos y enfriamientos son lentos. Esto supone que para ciclos de día y noche, durante el día refresca la casa con el frío de la noche y durante la noche la calienta con el calor del día. Otros materiales de construcción tienen una difusividad semejante, pero algunos otros es comparativamente más alta, sobre todo en cerramientos de anchos parecidos, como la piedra [25]. A continuación, en la figura 3.11, se presenta una tabla con las difusividades de los materiales más característicos en la edificación.

Material	Difusividad térmica (m/s ²)
Acero	$1,30-1,60 \times 10^{-5}$
Aluminio	$8,52-9,45 \times 10^{-5}$
Arena seca	$2,96-5,21 \times 10^{-7}$
Granito	$1,30 \times 10^{-6}$
Hormigón	$7,61 \times 10^{-7}$
Ladrillo común	$5,29 \times 10^{-7}$
Madera	$1,12 \times 10^{-7}$
Vidrio	$3,60 \times 10^{-7}$
Yeso	$5,38 \times 10^{-7}$

Fig. 3.11. Ejemplos de difusividades térmicas. [25]

3.4.2. Arcilla

La arcilla es una roca sedimentaria constituyente esencial de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, se hidrolizan. Desde el punto de vista mineralógico, el grupo de minerales que engloba, filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 0,002 mm) [26]. Debido a esta finura se les consideran coloides. Está constituida por agregados de silicatos aluminicos hidratados, procedentes de la descomposición de minerales de aluminio, y su fórmula química es: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con diversas sustancias, en especial compuestos polares, como el agua, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas con ella con elevada proporción de material sólido en líquido hasta siendo capaces en algunos casos de hincharse en su presencia.

Por otra parte, la existencia de carga en las láminas se compensa con la entrada en el espacio interlaminar de cationes débilmente ligados y con la hidratación, que pueden ser intercambiados mediante la puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada en otros cationes, (intercambio catiónico) y esta propiedad es la base de multitud de aplicaciones industriales.

Las arcillas son plásticas. Esta propiedad se debe, como se ha comentado antes, a que el agua envuelve las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. No obstante, no todas las arcillas se comportan de la misma manera. Esta situación es demostrable gracias a los límites de Atterberg: la relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Esta variación de las propiedades se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y la perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástica es la arcilla.

Por todo ello, la arcilla es el componente que da plasticidad a los productos de tierra para la construcción. El suelo ya lleva incorporada cierta cantidad de arcilla, pero puede ser excesiva o insuficiente. Es recomendable hacer ensayos de plasticidad del suelo para determinar los límites de Atterberg. De todas maneras, la falta de arcilla se nota a la hora de amasar el barro para crear las piezas de albañilería, ya que la masa se debe trabajar más duramente y apenas gana cohesión. Por el contrario, un exceso en la cantidad de arcillas produce una pieza con pérdida de resistencia.

3.4.3. Estabilizantes

Los estabilizadores mejoran las propiedades físicas del adobe, aumentando su resistencia, evitando la retracción durante el secado, evitando su erosión, impidiendo el alojamiento de insectos, mejorando la resistencia a la corrosión del agua [27]. Son productos que interaccionan con los elementos de la tierra mejorando sus características en los aspectos antes señalados.

Existen multitud de sustancias como ejemplos de estabilizantes: cal, yeso, cemento, resinas, polímeros, hidrofugantes, impermeabilizantes, aceites, grasas, emulsiones asfálticas, ceras, sosa, orín, estiércol, yema de huevo, caseína, puzolanas, paja, pelo, crin, hierba, corteza de coco, algodón, nylon... [2, 17, 27]

El cemento, la cal y el yeso son los estabilizantes más eficientes entre los que se pueden ser adquiridos fácilmente. Sin embargo, necesitan más energía que el resto para ser producidos, especialmente el cemento, lo que paliaría un poco las características sostenibles de la construcción con tierra.

La estabilización, además de químicamente mediante estos productos, se puede conseguir mediante un cambio en la granulometría de la tierra, añadiendo áridos externos a la propia tierra mejorando el esqueleto sustentante del bloque o compactando mecánicamente la tierra dentro del mismo molde. En este caso se estaría produciendo un BTC, cuya principal característica es que la pieza tiene una compactación superior, aumentando su densidad y su resistencia.

3.4.4. Agua

El agua es el agente que permite que las reacciones químicas de los estabilizantes se generen y el elemento que hace que la tierra gane plasticidad, básicamente mediante su absorción por parte de la arcilla. Por lo tanto el agua

es el componente que activa las propiedades de todos los demás para producir la pieza de tierra.

La humedad óptima del bloque de tierra es la que consiga una mayor densidad del bloque [22]. La cantidad de agua vertida en la mezcla debe asegurar una plasticidad suficiente evitando el exceso y el defecto, tanto dejando demasiado fluida la mezcla por un lado, provocando una disminución de la resistencia, o dejando disgregado el esqueleto por el otro, debido a una falta de cohesión entre las partículas.

Se puede conseguir el valor de esta humedad mediante ensayo de compactación proctor normal o modificado, según normas UNE 103500:1994 o UNE 103501:1994, respectivamente, o mediante el pesado sucesivo de bloques, añadiendo o disminuyendo la cantidad de agua hasta alcanzar la máxima densidad [22].

Durante el secado de la pieza a la sombra, el agua poco a poco desaparecerá dejando que las reacciones químicas se produzcan en el interior de la pieza. Para cuando el BTC esté completamente seco sus componentes habrán producido la máxima resistencia en cuanto a las posibilidades de esa combinación.

En el cuadro de la figura 3.12 se pueden observar las variaciones en cuanto a proporciones de estos elementos según las normativas mundiales.

3.5. Otros componentes de este trabajo

Este apartado describirá los elementos utilizados específicamente para los ensayos de este trabajo. Son: la cal apagada, como estabilizante, y la nanosílice, como objeto de estudio en cuanto a estabilizante sustituyente de la arcilla.

Técnica	Referencia	Textura			Tamaño máximo grano	Plasticidad		% Sales solubles	Contenido orgánico
		Arcilla	Limo	Arena		LL	IP		
Adobe	HB 193	10-40	10-30	Arena+ grava fina 30-75	25 mm				No usar capa vegetal. Prueba del olor
	NTE E080	10-20	15-25	55-70	5 mm				
	NMAC 14.7.4	mezcla de arena, limo, arcilla natural o paja-aren, que de un adobe sin serios alabeos y grietas						< 2	
	NZS 4298	Mas arcilla que en tapial			Tamaños que no dañen resistencia y comport.			No si afectan a resist. y durab.	No m.o = pudrirse/deteriorase
BTC	Houben y Guillaud	5-29				31-50	16-33		
	XPP 13-901	10-30				25-50	2,5-29		
	ARSO	8-30			10 mm (visto) 20 mm (ordinario)	25-50	2,5-29		
	HB 195	10-40	10-30	Arena+ grava fina 30-75					No usar capa vegetal. Prueba del olor. Eliminar restos orgánicos Pr. del rolito, esponjoso no válido
Tapial	MOPT	5-34							Libre de m.o y material deletéreo
	KS 02-1070								No m.o = pudrirse/deteriorase
	NZS 4298	6-22			Tamaños que no dañen resistencia y comport.			No si afectan a resistencia y durabilidad	
	Houben y Guillaud	8-30	10-25	25-80	10-25 mm	25-51	2-31		
Tapial	SAZS 724	5-15	15-30	Arena+ grava fina 30-70	no < 1" de diametro			< 2	
	MOPT	5-26							Pr del rolito, esponjoso no válido
	NMAC 14.7.4	no < (1/2") de diametro							Libre de m.organico
	NMAC 14.11.11	10-40	20-40	10-40 grava fina 10-20	38,1 mm 20 mm	< 40	6-22	< 2	Evitar tierras con restos orgánicos
Notas	Piet 70					< 35-45	< 15-30		No usar capa vegetal. Prueba del olor
	HB 195				Tamaños que no dañen resistencia y comport.			No si afectan a resistencia y durabilidad	No m.o = pudrirse/deteriorase
	NZS 4298								
	Houben y Guillaud	8-16				25-46	2-30		
<p>arcilla < 0.002; limo de 0.002 a 0.06 mm; arena 0.06 a 2 mm; grava 2 - 60 mm</p> <p>arcilla < 0.002 mm; limo de 0.002 a 0.5 mm; arenas de 0.5 a 5 mm; gravilla de 5 - 20 mm</p> <p>según norma AASHO, arcilla < 0.005 mm; limo 0.005 - 0.075 mm; arena fina 0.075 - 0.425 mm; arena gruesa 0.425 - 2.0 mm; grava > 2.0 mm</p>									
Valores deducidos de los monogramas.		Estabilizado							

Fig. 3.12. Cuadro resumen de composición. [23]

3.5.1. Cal hidratada

La cal es uno de los estabilizantes más antiguos de la historia, empleado en revocos y morteros con habitualidad ya en las épocas griega y romana; pero existente en la construcción desde las pirámides de Keops, en el antiguo Egipto, en el año 2600 a. C. [28]

Para comprender las reacciones químicas que la cal produce en los BTC se debe describir el proceso conocido como el ciclo de la cal (figura 3.13).

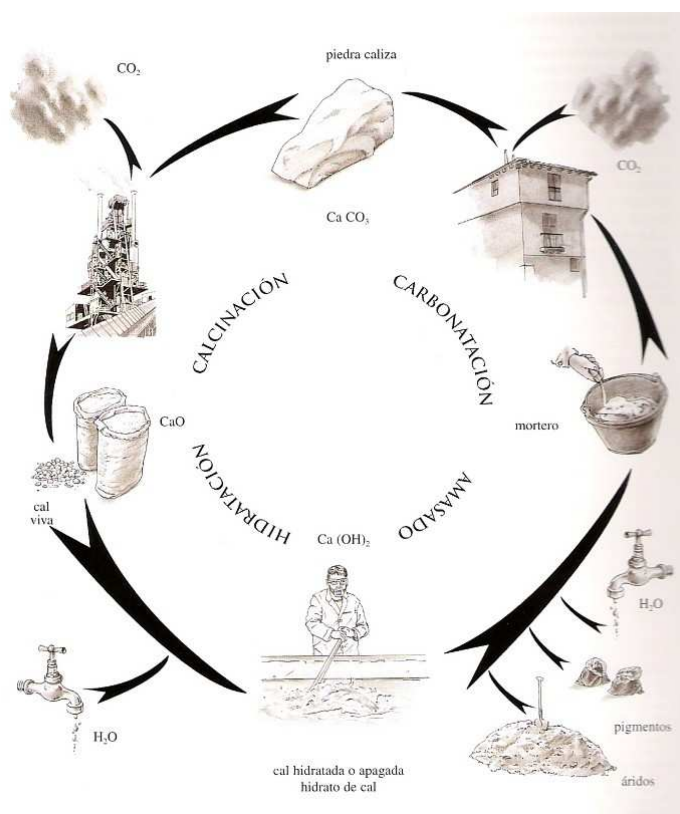
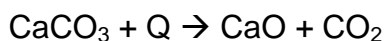


Fig. 3.13. El ciclo de la cal. [29]

La cal pasa por cuatro fases durante las cuales se transforma debido a su reacción con otros agentes y en la que al final vuelve a su estado original [28].

1. Calcinación

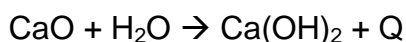
El ciclo de la cal se inicia con la calcinación o cocción a unos 900°C de la piedra caliza o carbonato cálcico, CaCO_3 .



Produciendo óxido de calcio o cal viva, CaO, al disociarse el dióxido de carbono del carbonato cálcico. El aspecto cal viva es de fragmentos irregulares.

2. Apagado

La cal viva se mezcla con agua, dando lugar a la cal apagada o hidróxido de calcio Ca(OH)₂.



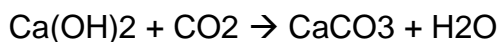
Cuando es apagada con agua reacciona exotérmicamente transformándose en una pasta blanca o en un polvo seco según la cantidad de agua aportada. En el caso de ser apagada con abundante agua, se consigue una pasta de cal que se conserva en balsas un mínimo de seis meses donde envejece, ocurriendo el proceso de micro cristalización pasando de cristales grandes a más pequeños. Cuanta mayor edad, se obtiene mayor extensión en superficie, mayor elasticidad y plasticidad, mejorando la adherencia y la resistencia.

3. Pasta de mortero de cal

A la cal apagada se le añade el agua y la arena para obtener el mortero de cal. El uso de la cal se da en esta fase, ya sea para morteros de unión, de cimentación, revocos o estucos.

4. Carbonatación

El mortero de cal va carbonatando con el CO₂ de la atmósfera, desde la superficie hacia dentro, conservando un núcleo húmedo, que es el que le confiere sus propiedades y elasticidad, gracias a la cual tiene un comportamiento mecánico más flexible, convirtiéndose con el tiempo en una costra pétreo de carbonato cálcico, similar a la piedra original.



Sin embargo la cal no tendría aplicación en este trabajo si no fuera por unas reacciones químicas que se dan durante la fase de uso. Estas reacciones se generan con sílice, en este ensayo básicamente aportada por la arcilla, pero que en la producción del cemento Portland se usan compuestos más eficientes, como las puzolanas o las cenizas volantes, para obtener más resistencia.

Al igual que en la obtención del cemento Portland, la cal y la sílice en presencia del agua forman silicatos cálcicos hidratados, cuya molécula es abreviada como C-H-S [30], considerado como gel, sustituyendo los débiles cristales de hidróxido de calcio y desprendiendo calor. En la actualidad no se conocen con precisión las fuerzas que dan cohesión a los geles entre sí pero se cree que se deben a dos tipos de fuerzas: las primeras relacionadas con una atracción física entre superficies sólidas (fuerzas de Van der Waals) y las segundas debidas a ligamentos químicos. No obstante, lo que es evidente es que este gel actúa como pegamento interior haciendo perdurar las fuerzas de cohesión entre las partículas [31]. La figura 3.14 representa la estructura idónea de las moléculas de gel C-H-S.

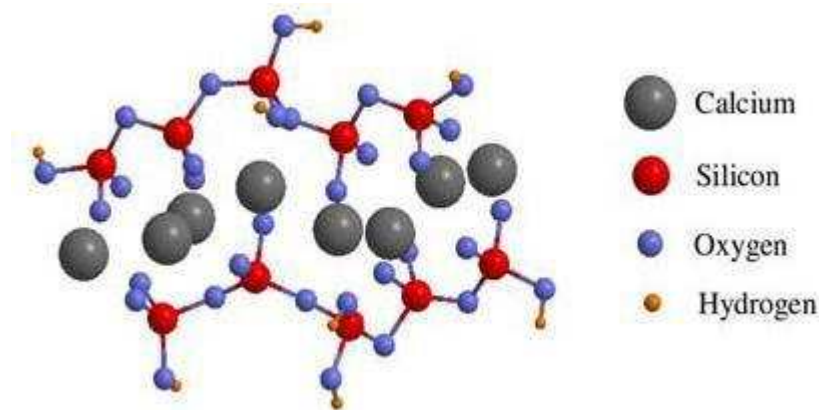


Fig. 3.14. Estructura de las moléculas de C-H-S [31]

El gel C-H-S generado por la reacción entre calcio, sílice y agua es el responsable de la alta resistencia de materiales como el cemento o el hormigón, y se pretende que lo sea en este trabajo para los bloques de BTC ensayados.

3.5.2. Nanosílice

En algunas probetas para los ensayos de este trabajo se va a usar nanosílice para comprobar, como es mencionado en los objetivos de este trabajo, si el tamaño de partícula de sílice en los BTC influye para aumentar su resistencia mecánica. Esta hipótesis está basada en el mismo efecto que la nanosílice produce en el hormigón.

Su forma de actuar se basa en que tiene la misma composición química que el cuarzo, la microsílíce o el humo de sílice. Se trata de SiO_2 . Su principal diferencia con el cuarzo es que éste es cristalino, mientras que la nanosílíce es amorfa. Y con respecto a la microsílíce y el humo, la diferencia está en el tamaño. Éstos tienen un diámetro de entre 200 y 1000 nm y la nanosílíce de entre 3 y 150 nm. Por tanto, las partículas de nanosílíce poseen una superficie conjunta de hasta 1000 m² por gramo, mientras que la microsílíce, por ejemplo, 20 m² por gramo [32].

La combinación de su forma irregular y pequeño tamaño hace que se comporte como una adición fuertemente activa en la elaboración de pastas, aumentando la resistencia mecánica de la misma [33, 34]. En este estudio, la nanosílíce reaccionaría rápidamente con el hidróxido de calcio, cal, produciendo compuestos minerales similares a los que produce el propio cemento, concretamente gel C-S-H (silicato de calcio hidratado).

En la figura 3.15 se muestra un cuadro comparativo de los materiales basados en sílice en función del tamaño de partícula.

Por lo tanto, la nanosílíce en cuanto a sus características de superficie y tamaño provoca varios sucesos beneficiosos entre los que destacan [35]:

- aumenta la capacidad de reacción entre los elementos de la mezcla;
- ocupa los huecos intersticiales que quedan entre ellos, reteniendo el agua libre intersticial;
- acelera la hidratación de las partículas, alcanzando antes los niveles de resistencia;
- puede participar en reacciones secundarias, originando un segundo aporte de moléculas C-H-S;
- las moléculas se organizan de una forma más ordenada, evitando el deslizamiento entre las capas del gel.

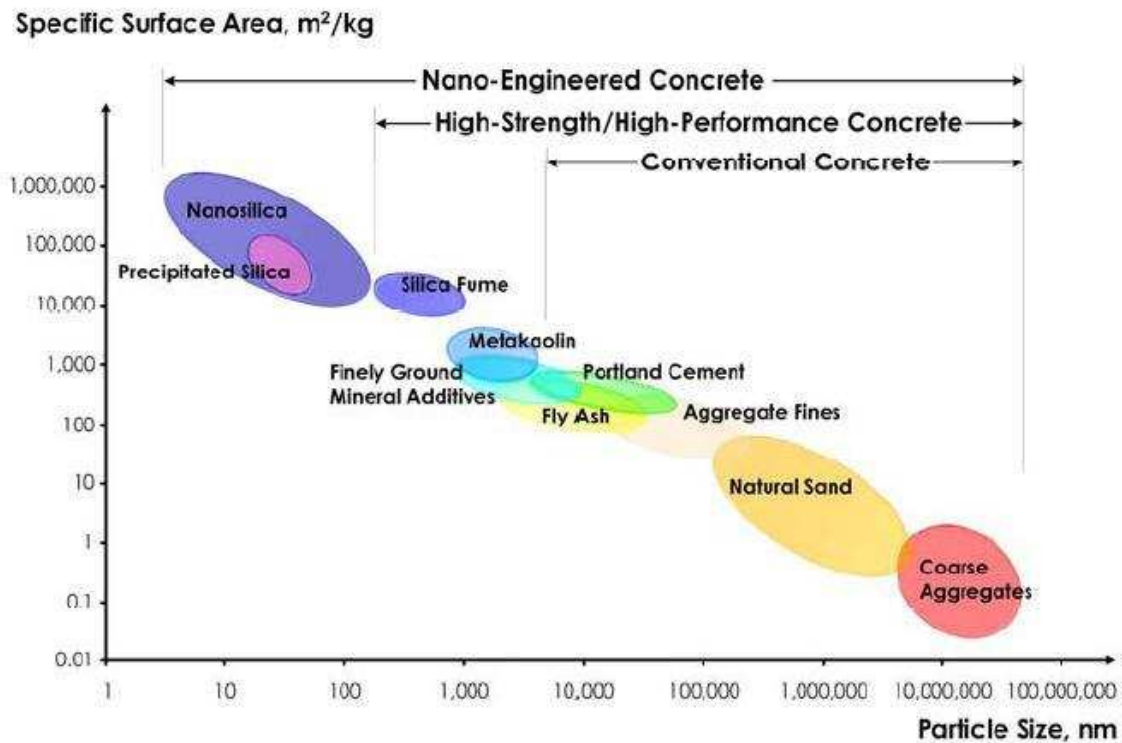


Fig. 3.15. Comparación de los tamaños de partículas de materiales silíceos. [35]

3.6. Experimentación

En este apartado se van a describir y comentar algunos de los ensayos y experimentos relativos a la resistencia a compresión y a los componentes de los BTC que se han desarrollado nacional e internacionalmente hasta la fecha. El formato narrativo será relatar la metodología y conclusiones de cada investigación para luego poder obtener unas conclusiones conjuntas.

3.6.1. Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks [36]

Las probetas de esta investigación fueron fabricadas con tierra arcillosa rica en cuarzo, cal en diferentes proporciones hasta un 12 %, y agua 30 %. El autor menciona los beneficios de las reacciones del gel C-S-H en las reacciones químicas durante el curado de 30 días de las probetas. Los gráficos del estudio (figura 3.16) demuestran que el aumento de la concentración de cal aumenta casi linealmente la resistencia a compresión del bloque. A partir del 6 % de cal, las partículas libres de sílice se mezclan y forman una microestructura homogénea. No obstante, con más del 12 % queda una estructura heterogénea

debilitando el bloque. Con 10 % la probeta alcanza el mayor grado de resistencia a compresión.

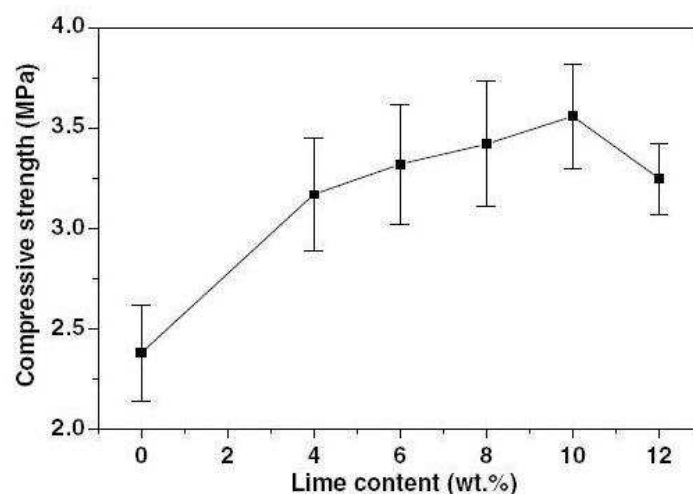


Fig. 3.16. Resistencia a compresión de probetas en relación al contenido de cal. [36]

Por otro lado, aconseja reducir el tamaño del cuarzo para mejorar las características mecánicas, así como incrementar la duración de hidratación dejando curar las probetas a la sombra y preservadas del aire.

3.6.2. Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure [37]

Test results

Bricks characteristics	Different walls treatment					
	Cement (%)		lime (%)		Cement (%) + Lime (%)	
	5	8	8	12	5 + 3	8 + 4
Compressive strength in dry state, MPa	15.4	18.4	15.9	17.8	17.5	21.5
Compressive strength in wet state, MPa	9	12.7	10.1	11.7	12.3	15.6
Water strength coefficient	0.58	0.69	0.64	0.66	0.63	0.7
Capillary absorption, %	2.35	2.2	3.7	2.9	2.3	2
Total absorption, %	8.27	7.35	9.8	9.02	8.1	7.9
Weight loss (wet-dry), %	1.4	1.25	2.3	2.1	1.2	1.0
Weight loss (freezing and thawing), %	2.35	2.23	3.7	2.9	2.3	2.0
Hole depth, mm – After spray test	1.0	0.5	2.2	1.0	1.0	0.5
Hole depth, ^a mm – Real life exposure	–	–	1.0	0.5	–	–

Fig. 3.17. Características de probetas con cemento y cal. [37]

En esta investigación se han ensayado probetas de BTC con diferentes proporciones y combinaciones de cemento y cal. Como puede verse en la gráfica de la figura 3.17, la relación entre la resistencia a compresión y la cantidad de estabilizante es directamente proporcional, al menos hasta las proporciones máximas de las probetas ensayas. También se comprueba que con cemento se necesita menor cantidad de estabilizante en comparación con la cal para alcanzar las mismas resistencias.

Otro dato relevante que da el estudio es que los nódulos de arcilla mayores de 5 mm de diámetro reduce la resistencia del bloque si se presentan en mucha proporción.

3.6.3. Potential use of stockpiled circulating fluidized bed combustion ashes (SCFBCA) [38]

Las SCFBCA son cenizas procedentes de combustiones no especificadas en el estudio. Se pretendían utilizar en el experimento para comprobar si mejoraban las características de los BTC. Las probetas fueron fabricadas con tierra que se componía de 56 % arena, 21 % limo y 23 % arcilla en su mayor parte y se dejaron curar durante 28 días. Los ladrillos con mejores resultados fueron los compuestos con SCFBCA, cenizas volantes, cal y arena.

Entre las probetas con adición de arena la mejor proporción era un 30 %, y con un 30 % de arcilla también se comportaban óptimamente. Sin embargo la adición de las SCFBCA hacía disminuir la resistencia y aumentar la absorción de agua. Al contrario de las cenizas volantes, que mejoraban estas características levemente. En las figuras 3.18 y 3.19 se puede observar estas conclusiones.

El autor además se sorprende por la mayor resistencia a compresión que origina la mezcla con cal que con cemento, ambos en proporciones iguales, 3 %, en cada una de sus respectivas probetas.

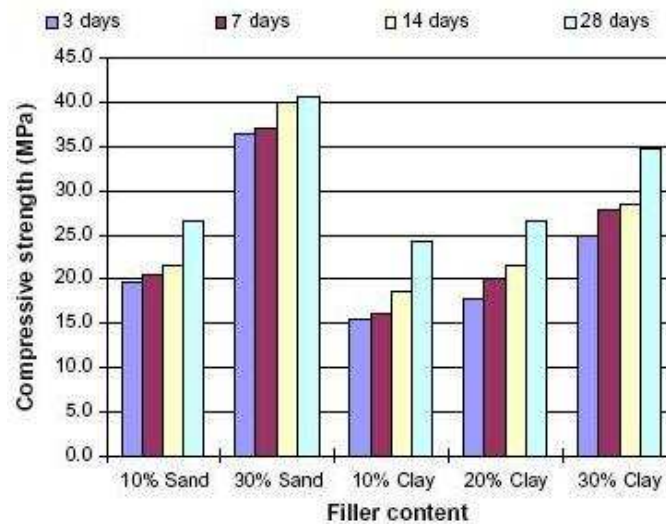


Fig. 3.18. Resistencia a compresión según proporciones de arena o arcilla. [38]

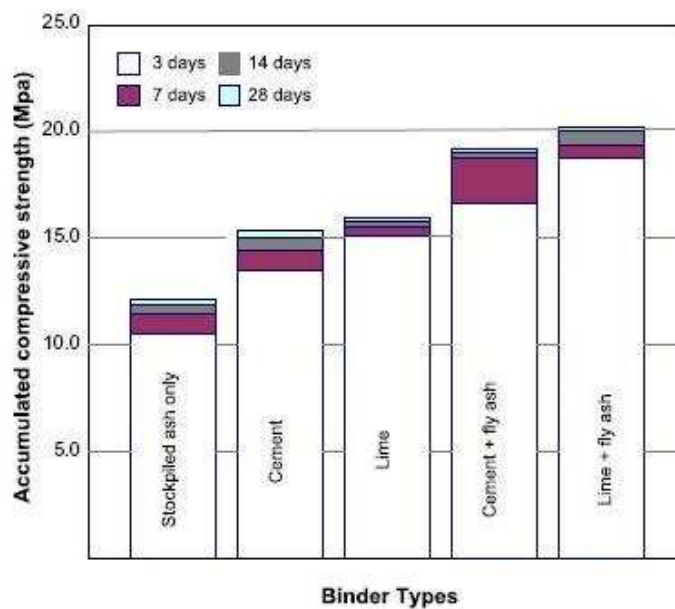


Fig. 3.19. Resistencia a compresión según composición de cemento, cal y ceniza volante. [38]

3.6.4. Compressive strength testing of compressed earth blocks [39]

En el estudio, se repasa varias investigaciones de probetas de BTC con cemento como estabilizante que han sido ensayadas para comprobar su durabilidad y resistencia a compresión. El estudio se centra en la influencia del factor de forma para la resistencia a compresión, sin embargo muestra un cuadro de la importancia de la cantidad de cemento como estabilizante en la propia resistencia a compresión (figura 3.20).

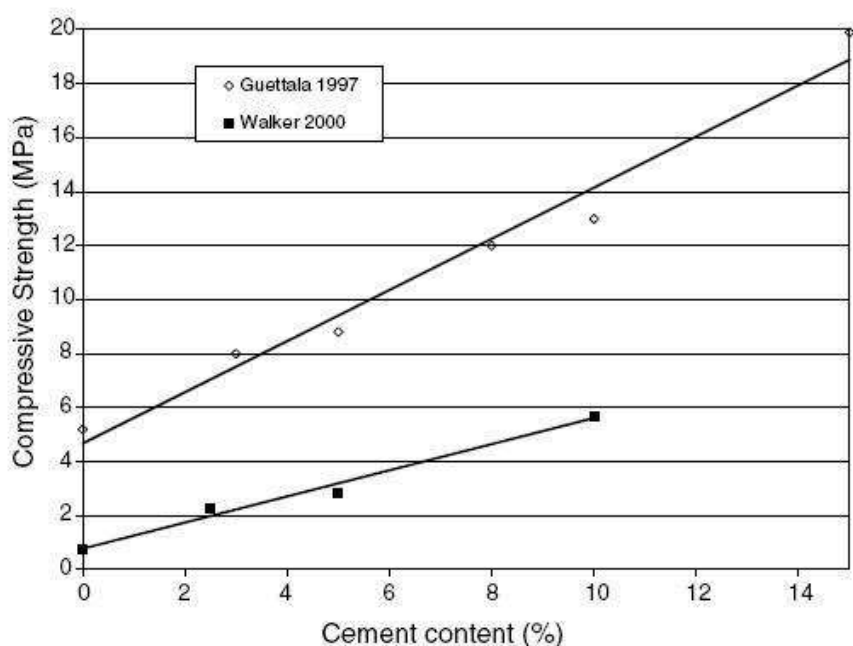


Fig. 3.20. Correlación entre el cemento y la resistencia a compresión. [39]

Se puede comprobar claramente la correlación positiva entre la cantidad de cemento aportada a la mezcla y la resistencia a compresión del bloque.

3.6.5. Earth building in Spain [40]

Este es un estudio de la situación española con respecto a la construcción con tierra. En la siguiente tabla (figura 3.21), dispuesta en el estudio con referencia a un documento del Ministerio de Obras Públicas sobre las bases constructivas de los tapiales, se puede comprobar, aunque no sean BTC, cómo los estabilizantes químicos basados en el calcio como el cemento y la cal mejoran la resistencia a compresión de las piezas de barro.

Las piezas de adobe y tapial han sido diferenciadas primeramente según el estabilizante y posteriormente según la concentración del estabilizante en tres proporciones generales: baja, media y alta. A medida que esta proporción es mayor, la resistencia de la pieza de tierra aumenta también.

Compressive Crushing Strengths

Kind of stabilization		Rammed earth ^a (N/mm ²)	Adobe (N/mm ²)
Unstabilized	Low strength	0.6	0.75
	Medium strength	1.2	1.5
	High strength	1.8	2.25
Portland cement stabilization	Low dosage	3	3.75
	Medium dosage	4.8	6
	High dosage	6.6	8.25
Lime and cement stabilization	Low dosage	2.4	3
	Medium dosage	3.5	4.4
	High dosage	4.8	6
Lime stabilization	Low dosage	1.8	2.25
	Medium dosage	2.4	3
	High dosage	3.6	4.5

^a Samples 5 x 5 x 5 cm cut from a wall

^b For an adobe unit

Fig. 3.21. Resistencia a compresión de probetas de tapial y adobe. [40]

3.6.6. Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick [41]

Aquí se han confeccionado probetas con cal y cenizas de cáscara de arroz (RHA) como estabilizantes. La mejor proporción para la base del bloque es arcilla 70% y arena 30% con una humedad del 19%. En el estudio el autor se señala que el bloque, aunque resiste más en seco sólo con arcilla, con la presencia de arena, además de con arcilla, pierde menos resistencia en presencia del agua (figura 3.22). La cantidad de cal usada para las probetas de BTC ha sido de 5 %.

Sin embargo, resulta interesante observar que la mezcla sin arena adquiere mayor resistencia que con ella. Ha podido ser debido a un exceso de los áridos finos en las probetas, ya que ya tenían tierra como componente principal.

Para estos ensayos se comprimieron los bloques con una carga de 15 MPa y estuvieron curando 28 días a una temperatura de 30° C aproximadamente.

Lime:RHA ratio	Dry		Wet		Strength loss	
	Clay	Clay-sand	Clay	Clay-sand	Clay	Clay-sand
0	13.3	11.2	-	-	-	-
1:3	16.7	14.9	10.4	12.0	38	20
1:2	18.1	17.7	11.8	15.1	35	15
1:1	20.7	18.6	15.5	16.1	25	13
2:1	17.3	16.6	14.8	15.2	15	9
3:1	15.4	13.0	13.8	12.4	11	5

Fig. 3.22. Resistencia a compresión de probetas con cal y ceniza de arroz. [41]

3.6.7. The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization [42]

Otro estabilizante basado en el calcio, el yeso, ha sido usado para esta investigación. Utiliza dos materiales diferentes: el yeso natural y el yeso rico en fósforo procedente de residuos de fertilizantes. Como se ve en la figura 3.23, la resistencia a compresión aumenta considerablemente a partir de un 10 % de yeso y permanece estable con 25 %. Se alcanza asimismo menos resistencia con el yeso rico en fósforo que con el natural. Sin embargo, la investigación señala que el aumento de la cantidad de yeso con fósforo reduce la contracción de los bloques.

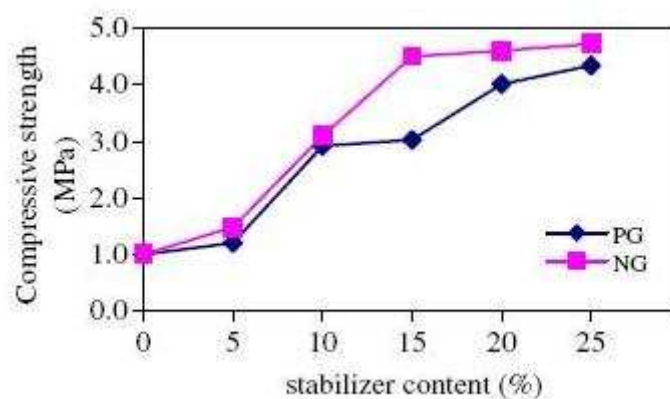


Fig. 3.23. Resistencia a compresión de BTC con diferentes yesos. [42]

3.6.8. Sustainable housing in island conditions using Alker-gypsum-stabilized earth: A case study from northern Cyprus [43]

La técnica Alker es un tipo de construcción en Turquía desarrollada por la Universidad Técnica de Estambul basada en la tierra cruda mezclada con cal y yeso para estabilizarla [44]. En este estudio se ha mezclado tierra (compuesta de alrededor 8 % de arcilla) con 2 % de cal, 10 % de yeso y 20 % de agua. Se deja en suelo húmedo y protegido del sol durante 2-3 semanas, cambiando de lado de apoyo para airear todas las caras.

Las propiedades mecánicas del estudio han sido las siguientes: densidad 1,6-1,7 t/m³, resistencia a compresión entre 2 y 4 N/mm² y resistencia a cortante entre 0,9 y 1,3 N/mm².

3.6.9. The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes [45]

Las fibras son el material analizado principalmente en este estudio. Sin embargo, posee datos relevantes: las probetas han sido tomadas en Alemania y su composición era 15 % arcilla, 25 % limo y 60 % arena. El aumento de fibra reduce la contracción y aumenta la resistencia a flexión, pero disminuye linealmente la resistencia a compresión, ya que necesita más agua y pierde densidad. Por otra parte, el aumento de agua y de arcilla provoca contracciones mayores.

3.6.10. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review [46]

Esta investigación se propuso hacer un repaso por las normativas mundiales sobre la construcción con tierra comprimida y no comprimida para obtener relaciones entre ellas en cuanto a sus componentes. Una conclusión alarmante fue que eran muy variadas y en muchos aspectos no tenían relación las composiciones de las materias primas.

No obstante, en lo relativo a este trabajo, el autor de ese estudio concluyó que las exigencias establecían el contenido de arcilla entre 10 y 15 % para tierra no comprimida, y para BTC, variaba entre 10 y el 22 %, y el limo entre 10 y 25 %.

3.7. Conclusiones de antecedentes

La tabla siguiente muestra un resumen de los porcentajes en la composición de los BTC obtenidas durante la exposición de antecedentes:

Fuente	Tierra	Arena	Limo	Arcilla	Cal	Cemento	Yeso
11							
19		65	20	15			
23		50	20	20			
36					10		
37					12	8	
38		56	21	23	3	3	
39						10	
41	70	30			5		
42							15
43				8	2		8
45		60	25	15			
46			20	15			

Tabla 3.1. Resumen de proporciones en Antecedentes

Alguna de las tierras de las investigaciones han sido sus datos descompuestos en áridos en la tabla 3.1. Pero como se ve en la tabla, existen varios aspectos comunes en varias de las fuentes: Las proporciones de áridos de la tierra suelen ser 60 % arena y 20 % limo, con la existencia de arcilla en un 15 %. En los BTC que han sido estabilizados varía la composición dependiendo de las intenciones de las investigaciones. Según los ensayos más similares a los objetivos de este trabajo, la cal está representada en un 10-12 %. Respecto a otros estabilizantes basados en el calcio, que no son objeto de estudio en el presente trabajo, se puede comentar a modo de interés que el cemento es óptimo es proporciones cercanas al 8 % y el yeso, al 10 %.

Fuera de los aspectos señalados en la tabla se destacan varios aspectos en las características de los BTC. La primera de ellas es el tamaño máximo de árido, que suele establecerse en 2 mm, la principal fuente que nos atañe en este dato es la UNE EN 41410. La densidad seca se posiciona cercana a los 2 g/cm³, pero generalmente en torno a los 1,8. En lo relativo a las resistencias a compresión, que es la característica mecánica analizada aquí, los valores difieren mucho entre los ensayos, ya que depende de muchos factores, entre ellos los objetivos del experimento y la forma de producción principalmente; y, aunque los componentes sean parecidos en cualidades y proporciones, no tienen porqué asegurar resistencias semejantes. De todos modos, como reseña, se podría decir que generalmente los valores óptimos de cada uno se colocan entre 5 y 15 N/mm².

Estas indicaciones se tendrán en cuenta a la hora de confeccionar las probetas de BTC que serán ensayadas para este trabajo.

4. Metodología

En el capítulo de metodología se describirá todo el proceso de producción de los BTC y las razones por las que se ha decidido tales procedimientos. Asimismo, se irá ilustrando las narraciones con fotografías de momentos interesantes del proceso.

4.1. Consideraciones previas

El objetivo principal del trabajo, como indica su título, es marcar la diferencia entre los tamaños de las partículas de sílice que contribuyen a estabilizar los BTC, conociendo la diferencia aportada entre la arcilla y la nanosílice. Debido a este compromiso, se ha decidido fabricar los mismos BTC sin tierra extraída, sino con arena, limo y arcilla, ya que se deseaba controlar a la perfección la cantidad de sílice añadida a cada serie.

No obstante, la tierra extraída tiene una composición difícilmente conseguible por métodos artificiales, ya que tiene una proporción de finos muy alta debido a la constante erosión que tiene el terreno, disgregando los áridos cada vez más, hasta tamaños de limo y arcilla. Se han tomado ciertas decisiones para que esta circunstancia no fuera un impedimento a la hora de ensayar a compresión los BTC.

Ya que es difícil la producción de limo artificial con medios discretos, se tomó en consideración la utilización de áridos finos para compensar el conjunto de áridos óptimo recomendado por la UNE EN 41410. El árido usado por lo tanto es arena de río de tamaño 0,4 mm, generalmente. Más adelante se mostrará la granulometría exacta.

Además, para tener una muestra de áridos menor en las probetas se decidió tamizar otra parte de la arena para obtener limos, y tener al menos una representación menor de ellos. Así, las materias primas que componen estos BTC son: arena, limo, agua, cal, arcilla y nanosílice en diferentes proporciones.

Se han fabricado cuatro series de cuatro probetas cada una, en total 16 probetas, según las características que se detallan a continuación:

- Serie I: bloque estabilizado con cal y arcilla y comprimido manualmente sobre el molde.
- Serie II: bloque estabilizado con cal y arcilla y comprimido con prensa neumática sobre el molde.
- Serie IIIa: bloque estabilizado con cal, arcilla y nanosílice con la misma humedad que las anteriores probetas y comprimido con prensa neumática sobre el molde.
- Serie IIIb: bloque estabilizado con cal, arcilla y nanosílice con mayor humedad que las anteriores probetas y comprimido con prensa neumática sobre el molde.

La serie IIIb se realizó con más agua que la serie IIIa debido a la escasa trabajabilidad que había originado la adición de nanosílice, ya que siendo partículas tan pequeñas se rodean de gran cantidad de agua, dejando al conjunto sin suficiente agua para su fácil mezclado. Por ello, en la serie IIIa se dedicó mucho más tiempo al mezclado manual.

4.2. Materiales y equipos

Las materias primas utilizadas para la confección de las probetas de BTC han sido mencionadas a lo largo de este trabajo. No obstante, en este apartado se resumirán en un esquema completo con ilustraciones.

- Arena de río: adquirida en almacenes de materiales en bolsas de unos 15 kilogramos, en estado húmedo (fig. 4.1). Fue necesario desecarla en estufa.
- Limo: árido fino tamizado mecánicamente por el tamiz de 0,063 mm (fig. 4.2). Se molía la arena de río previamente para aumentar su

concentración de limos. Después de tamizar, el árido retenido se volvía a triturar y así sucesivamente hasta que el contenido de limos no aumentaba considerablemente.



Fig. 4.1. Arena de río

- Cal hidratada: adquirida en almacenes de materiales (fig. 4.2). Marca Calcasa, hidróxido de calcio CL-90 S. La ficha técnica del anexo 1 muestra las características de este producto.
- Arcilla: adquirida en almacenes de materiales. Con humedad natural (fig. 4.2). Se tamizó por el tamiz de 2,5 mm para usar tan sólo el material que pasaba por él.



Fig. 4.2. Resto de materias primas

- Nanosílice: adquirida mediante pedido por internet. Marca Sigma referencia S5130-25G en forma de polvo y de tamaño de diámetro 7 nanómetros. En la figura 4.2 se ve el gran volumen que ocupaban 10 gramos del producto. Las fichas técnica y de seguridad del anexo 2 muestran las características de este producto
- Agua: agua potable del canal de Isabel II en la ciudad de Madrid.

Los equipos usados para tratar las materiales, producir las probetas y ensayarlas son los siguientes:

- Tamizadora mecánica: oscilante con gran variedad de tamices (fig. 4.3). De control analógico. El tiempo de tamizado variaba entre 30 y 60 segundos dependiendo de la materia y cantidad de la misma.
- Limpiador de tamices: mediante vibración por ultrasonidos (4.3). Se dejaban diez minutos cada una de las mitades de cada tamiz.



Fig. 4.3. Equipos usados

- Tamices: para la separación de limos se utilizaron los tamices de 4, 2, 1, 0,25 y 0,063 mm; para la separación de la arcilla fina se usaron de 2, 1 y 0,25 mm; para la granulometría del árido se utilizaron los correspon-

dientes por la Norma UNE 103101:1995, análisis granulométrico de suelos por tamizado [47], acordes al árido empleado: 10, 6,3, 5, 2, 1,25, 0,40, 0,16 y 0,08 mm.

- Trituradora mecánica: de mandíbulas y control analógico (4.3). Se pasaba varias veces la arena por la misma para aumentar su eficiencia.
- Estufa para desecado: a una temperatura constante de 110° C. Usado durante 24 horas para desecar la humedad natural de la arena de río (fig. 4.4).
- Molde para las probetas: molde de madera con capacidad para dos probetas (4.4). Se diseñó desmontable mediante tornillos para evitar la ruptura en húmedo de las probetas al sacarlas del molde.
- Balanza digital: de precisión hasta los 0,1 gramos (4.4).



Fig. 4.4. Equipos usados

- Prensa neumática: prensa para ensayar bloques de hormigón que se utilizó para compactar las probetas dentro del molde (fig. 4.5).
- Máquina de ensayos: neumática y controlada por un programa informático. Se usó para ensayar las probetas a compresión (4.5).

- Herramientas diversas: platos metálicos, boles cerámicos, vasos de vidrio, paletas, palas de mano, brochas, desencofrante, taladrador eléctrico, guantes, mascarillas, etc.

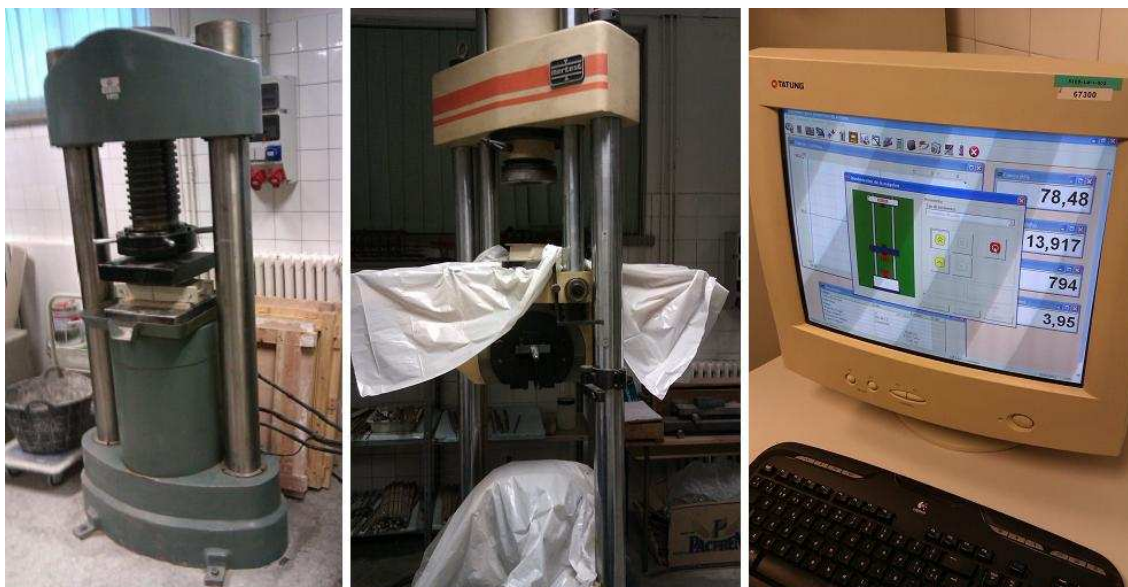


Fig. 4.5. Equipos usados

4.3.Composición

Las proporciones en peso de los componentes para fabricar las probetas de BTC son las siguientes:

Comp. (g.)	Arena	Limo	Cal	Agua	Arcilla	Nanosílice	Total
I	470	30	120	170	210	0	1000
II	470	30	120	170	210	0	1000
IIIa	470	30	120	170	200	10	1000
IIIb	470	30	120	250	200	10	1080

Tabla 4.1. Composición en pesos de las series

La tabla 4.1 muestra los pesos utilizados de cada materia prima para confeccionar alrededor de un kilogramo de tierra estabilizada. En cuanto a los componentes, se puede dar alguna otra indicación de la razón para estas cantidades. A continuación se disponen las proporciones de la mezcla húmeda en porcentajes sobre el peso total.

Comp. (%)	Arena	Limo	Cal	Agua	Arcilla	Nanosílice	Total
I	47	3	12	17	21	0	100
II	47	3	12	17	21	0	100
IIIa	47	3	12	17	20	1	100
IIIb	43,5	2,8	11,1	23,1	18,5	1	100

Tabla 4.2. Composición en porcentajes de las series

Se puede comprobar en la tabla 4.2 que la adición de agua en la última serie reduce los porcentajes del resto de materiales sobre peso húmedo. Sin embargo, después del curado, las proporciones se unifican sobre peso natural.

La proporción de cal es mayor que la aceptada en las conclusiones del anterior capítulo porque la presencia de nanosílice, altamente reactiva podría necesitar más moléculas de hidróxido de calcio para que todas sus partículas reaccionen completamente. Por eso se ha querido dejarla alta, ya que el exceso de cal hidratada no es perjudicial en pequeñas cantidades. También la arcilla tiene mayor representación que lo mencionado en la tabla resumen de antecedentes porque además de la que debía ser aportada como estabilizante, se debía compensar la carencia de ella en los áridos aportados, ya que no es tierra extraída.

De todos modos, para conocer los valores exactos en su composición se realizó un ensayo cualitativo para conocer la plasticidad óptima aproximada de la primera serie, mediante bolas de mezcla [22]. Las bolas se amasaban y se comprimían con las manos para luego dejarlas caer desde una cierta altura. La galleta que se quedaba en el suelo debía mantenerse unida, sin disgregarse, pero debía estar bastante aplastada. Estas propiedades darían a la mezcla la suficiente cantidad de arcilla para mantener la cohesión pero también la suficiente cantidad de árido para que no quedara demasiado compacta y entre ambas pudiera ser un material resistente y maleable. Las ilustraciones de la figura 4.1 muestran las veces que se comprobó proporciones y los resultados de las mismas, cambiando las cantidades hasta dar con la mezcla óptima.



Fig. 4.6. Ensayo de consistencia

El procedimiento para este ensayo ha sido el siguiente:

- Se moldean bolas de mezcla unos 200 g. y se comprimen con las manos para compactar. Primero se intenta conseguir la referencia de agua y arena de río. Cuando se conoce la cantidad de saturación aproximada de la arena se procede a mezclar las bolas con cal y arcilla húmeda para hacer las pelotas siguientes y conseguir la proporción idónea de los cuatro materiales.
- Se dejan caer desde 1,20 m haciéndose galleta al estrellarse contra el suelo. Al aplastarse la bola aumenta su diámetro y pueden desperdigarse fragmentos alrededor.
- Se valoran los resultados del ensayo y se decide los cambios en la composición para ajustar su consistencia.
- Una vez los resultados sean satisfactorios se apuntan la proporciones y se consultan para hacer la mezcla de las probetas.

La siguiente tabla muestra las cantidades en peso usadas en las 6 bolas de mezcla para el ensayo de consistencia. A continuación se comentan los resultados y sus valoraciones para siguientes composiciones.

Ref. # / g.	Arena	Agua	Cal	Arcilla
1	152,2	50,0	0	0
2	151,5	30,1	0	0
3	150,1	30,2	15,0	31,0
4	150,7	50,7	15,8	61,4
5	150,0	40,3	15,0	60,6
6	150,2	45,2	15,0	60,2

Tabla 4.3. Composición en peso de las bolas de la mezcla

1. Se sobresatura la arena. Al dejar caer la pelota de barro se esparce en muchos fragmentos. Se baja la cantidad de agua para la siguiente.
2. La cantidad de agua es adecuada, pero la pelota sigue esparciéndose en exceso. Se añaden cal y arcilla para la siguiente.
3. El núcleo quedó plástico pero los bordes de la galleta se desperdigaron. Se suben las cantidades de agua y arcilla para la siguiente.
4. Casi toda la mezcla quedó agrupada donde cayó, pero demasiado fluida. Se baja el agua para la siguiente.
5. La galleta quedó casi como estaba al estrellarse el suelo. Demasiado cohesiva. Se sube el agua para la siguiente.
6. La galleta queda unida y aumenta un par de centímetros el diámetro de la pelota. Proporciones óptimas.

Por lo tanto, como muestra la tabla 4.3, los porcentajes obtenidos del ensayo de consistencia fueron: arena 55,5; agua, 16,8; cal: 5,5; arcilla: 22,2. Aunque el ensayo se hizo con cal para acercarse más a la realidad de las probetas, no intervenía prácticamente en la plasticidad de la mezcla.

Como se ha mencionado antes, la arcilla se echó sin desecar. Se ha realizado una medición de la humedad natural de la arcilla usada en este ensayo, habiendo dejado la muestra en horno durante 48 horas:

$$P_{húm} = 151,4 \text{ g.}; P_{des} = 128,7 \text{ g.}; P_{agua} = 22,7 \text{ g.}$$

$$Hum = \frac{22,7}{128,7} \cdot 100 = 17,6 \%$$

4.4. Análisis granulométrico del árido

El análisis granulométrico de la arena de río empleada en los BTC se ha orientado en lo dispuesto en la norma UNE 103101, análisis granulométrico de suelos por tamizado, que es lo indicado a seguir según la norma UNE 41410, bloques de tierra comprimida para muros y tabiques.

Se apartó 2 kilogramos de muestra y se desecó durante 24 horas en horno. Se sacó y se dejó enfriar hasta temperatura ambiente en atmósfera libre. Se pesó en balanza y se anotó: 2019 gramos. Se utilizaron los siguientes tamices para el ensayo: 10; 6,3; 5; 2; 1,25; 0,40; 0,16; 0,08 mm. Esta muestra se tamizó entre los tamices 10 y 2 mm. Lo retenido en el tamiz de 2 mm se lavó y se decantaron los finos que pasaron. Estos finos se unieron al fondo y se metieron tanto lo retenido en el tamiz como el fondo en el horno durante 24 horas. Los áridos retenidos en el tamiz 2 mm y los finos decantándose están ilustrados en la figura 4.7.



Fig. 4.7. Análisis granulométrico de suelos

Se sacaron y se dejaron enfriar a temperatura ambiente. Se pesó lo retenido en los tamices entre 10 y 2 mm. Como es arena de río tan sólo 6 gramos quedaron retenidos en el tamiz 2 mm. El resto pasó el tamiz, y de ello se cuarteó alrededor de 100 gramos de muestra, se pesó y se anotó: 104,70

gramos. Se tamizó esta muestra por el tamiz 0,08 mm, y lo retenido se lavó. El árido retenido se dejó secar en horno durante 24 horas.

Se dejó desecar hasta temperatura ambiente por última vez y se tamizó por los tamices del 2 al 0,08 mm. Los pesos retenidos en cada tamiz se resumen en la siguiente tabla.

Tamiz (mm)	Retenido parcial (g.)	Retenido total (g.)
2	0	0
1,25	10,8	10,8
0,40	78,2	89,0
0,16	10,7	99,7
0,08	2,0	101,7

Tabla 4.4. Pesos retenidos en el último bloque de tamices

Los 3 gramos restantes de la muestra inicial de 104,7 gramos son los limos que pasaron el tamiz de 8 mm. Se puede ver en la tabla 4.4 que la arena de río adquirida para la confección de probetas es mayoritariamente 0,4 mm.

Hay que recalcar que el ensayo se ha adaptado ligeramente a las características del árido, ya que no presenta muchas de las propiedades de los suelos al completo. Con todo ello, los porcentajes de árido que pasa por los tamices son los expuestos en esta tabla:

Tamiz (mm)	% que pasa
5	100
2	99,7
1,25	89,7
0,40	15,0
0,16	4,7
0,08	2,8

Tabla 4.5. Porcentaje que pasa por los tamices

Por otro lado, el contenido de limos, como se esperaba, está muy por debajo de lo señalado en el cuadro resumen 3.1, por lo que se eligió fabricar limo,

como se ha comentado en el apartado 4.2 y añadirlo en las cantidades indicadas en la tabla 4.1. En el anexo 3 se adjunta la ficha completa del análisis granulométrico.

4.5. Fabricación de las probetas

Se utilizó un bol cerámico donde verter las materias primas y amasar la mezcla. Cada amasada contenía alrededor de 2 kilogramos de mezcla. Con las proporciones antes señaladas se pesaban los materiales en balanza con precisión de decenas de gramos y se vertían en el bol. Una vez, los sólidos estaban vertidos se mezclaban en seco para homogeneizar (fig. 4.8). El último componente era el agua. Con el agua se amasaba manualmente la mezcla hasta color constante, que no existiera ninguna mota de otro color distinto al barro creado (4.8). Para amasar había que mover toda la masa conjuntamente apretando los dedos con fuerza para aprovechar la plasticidad de la arcilla y así homogeneizar la mezcla húmeda. El amasado llevaba entre 5 y 10 minutos, excepto en la serie IIIa que se amasó durante unos 15 minutos.



Fig. 4.8. Amasado de probetas

Cuando estuviera lista se llenaba el molde. Se mezclaba también dentro del molde con los dedos para que ocupara todas las esquinas y se repartiera con igualdad en todo su volumen (4.8). Se realizaba una aplicación previa con

brocha de aceite desencofrante en el interior del mismo (fig. 4.9). Una vez lleno se excedía la mezcla por encima del molde para tener masa para el prensado y se comprimía manualmente antes de pasar a la prensa.

El molde fue fabricado con madera laminada. Se implementó un sistema de taladros en todas sus caras y en su base para desmontarlo minimizando las pérdidas de tierra de la probeta por desmolde (4.9). El molde constaba de dos huecos, por lo que las probetas se fabricaban de dos en dos. Las dimensiones del BTC desmoldado eran aproximadamente: 110 x 110 x 55 milímetros.



Fig. 4.9. Compactado de probetas

Una vez preparado el molde en la prensa se hacía subir el pistón a una velocidad lenta (4.9). No se podía calcular la fuerza con que aplastaba la prensa la probeta porque húmeda no ofrecía resistencia al movimiento del pistón; así que se decidió establecer la detención de la prensa cuando el molde empezara a crujir, en previsión de rotura. La compactación de la primera serie se hizo manualmente mediante una pieza de madera por una cara húmeda con la fuerza de los brazos (fig. 4.10).

Después de la compactación se quitaba el sobrante de la mezcla con una cuchilla y se enrasaba con la misma hasta el borde del molde (4.10). Al final de cada amasada se desechaba el sobrante de la mezcla. Se dejaba alrededor de un minuto dentro del molde y luego se procedía a desmoldar sobre el lugar de

curado retirando las piezas del propio molde. La serie IIIb se dejó un par de minutos dentro del molde ya que contenía más agua. A continuación se procedía al limpiado y reconstrucción del molde y se empezaba una nueva mezcla para la siguiente amasada o la siguiente serie.



Fig. 4.10. Acabado de probetas

Para las series IIIa y IIIb, la confección de la mezcla fue realizada con mascarilla, por el riesgo de inhalación de las partículas de nanosílice, que pueden dañar los alveolos pulmonares (fig. 4.11). Por otro lado, en la misma figura 4.11 se puede comprobar la diferencia en la textura de ambas mezclas de las series con nanosílice, cuya única diferencia era la cantidad de agua.



Fig. 4.11. Mezclado con nanosílice

Una vez desmoldados todos los BTC se dejaron curar durante 28 días en el laboratorio, sobre un plástico, a la sombra, sin corrientes de aire y a una temperatura que oscilaba entre 19 y 23 grados centígrados. A los 14 días se procedió a darles la vuelta para permitir un secado aireado por la cara inicial de apoyo. La siguiente figura muestra los BTC húmedos como resultado de la fabricación de las series.



Fig. 4.12. Finalización de fabricación de los BTC

5. Resultados y discusión

De aquí en adelante se expondrán y se comentarán los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión de los BTC fabricados. Se mostrarán tablas y gráficas que ayudarán a discutir las características de cada una de las series individualmente, aparte de un amplio estudio comparativo entre sus medias, que establecerá correspondencias entre los rangos de estas características.

5.1. Procedimiento de medición

Antes de mostrar los resultados de los ensayos se describirá el procedimiento que se ha seguido para hallar los datos de los bloques, necesarios para generar un análisis óptimo.

En la figura 5.1 se pueden ver las probetas curadas una vez pasados los 28 días, según lo explicado en el capítulo anterior. Al evaporarse el agua sobrante de los BTC el color de los mismos se aclara.



Fig. 5.1. Finalización del curado de los BTC

Primeramente se va a comenzar describiendo el procedimiento de ensayo. Se empieza midiendo y pesando cada bloque. La pesada se hace en balanza digital con precisión de décimas de gramo (fig. 5.2) y la medición se hace con cinta métrica con precisión de 1 mm. (5.2). Las mediciones de sus caras ha sido de la siguiente manera: se midieron las cuatro aristas de las caras superior e inferior haciendo una media de las cuatro en cada dirección; y las cuatro aristas laterales, haciendo una media de las cuatro también. Las medias fueron redondeadas a múltiplos de 5 en las décimas de milímetro.

Cuando se procedió al pesado se comprobó como característica común de todos los bloques que el secado perimetral había sido mucho más rápido, ya que en la base donde estaba apoyada por primera vez la probeta se observó un claro cambio de color (5.2).



Fig. 5.2. Medición de los BTC

Los datos que se han obtenido de estas mediciones son los mostrados en la siguiente tabla:

BTC	Longitud (mm.)	Anchura (mm.)	Espesor (mm.)	Peso (g.)
I1	108,5	107,5	54,0	1075,5
I2	109,0	108,0	54,0	1060,1
I3	109,0	109,5	53,5	1058,4
I4	111,0	109,5	53,0	1065,4
II1	113,0	110,5	54,0	1149,6
II2	113,0	107,5	54,0	1116,6
II3	109,5	108,0	54,0	1089,0
II4	108,0	108,0	54,0	1115,4
IIIa1	114,0	109,0	55,0	1111,9
IIIa2	109,5	108,5	55,0	1058,6
IIIa3	112,0	109,0	55,0	1075,9
IIIa4	110,0	109,0	55,0	1077,3
IIIb1	109,5	106,0	55,0	973,3
IIIb2	110,0	109,0	54,5	991,0
IIIb3	108,0	107,5	54,0	965,9
IIIb4	110,0	107,5	55,0	964,6

Tabla 5.1. Dimensiones y peso de los BTC

5.2. Procedimiento de ensayo

A continuación se procedió al ensayo de resistencia a compresión. Como las caras de las probetas no son totalmente planas ni paralelas se usó un material auxiliar de mayor resistencia que pudiera ser levemente moldeado ante la presión de la máquina de ensayo: tablillas de madera laminada de 3 mm de espesor (fig. 5.3), que se colocaron encima y debajo del BTC.

De uno en uno se colocan los bloques centrados en la plataforma de rotura y mediante las órdenes del programa informático se sube el pistón a una velocidad relativamente rápida hasta que hace presión con las tablillas. A partir de ahí se comprimirían los BTC a una velocidad constante de 0,4 mm/min. El ordenador refleja la carga instantánea necesaria que aplican los pistones de la máquina para mantener esa velocidad de compresión. Una vez terminado el

ensayo con cada probeta, se limpiaba la plataforma, se guardaban los datos y se continuaba con la siguiente.



Fig. 5.3. Ensayo a compresión

Los bloques resistían sin fisuras poco tiempo. Las fisuras empezaban a manifestarse verticales en las aristas de las caras laterales y poco a poco se iban expandiendo a lo largo de toda la cara lateral. Hacia la mitad de la carga máxima las caras laterales ya estaban separadas de la masa del bloque (fig. 5.3). Una vez alcanzada la carga máxima, el esfuerzo que necesitan los pistones para seguir avanzando a la misma velocidad va disminuyendo progresivamente. Cuando se concluía el ensayo, un tiempo después de alcanzar la máxima resistencia, se comprobaba que los BTC rompían con forma troncocónica doble invertida (5.2), como la típica manera de romper de las probetas de hormigón. No obstante, una cualidad adicional es que cuanto más centradas eran las capas laterales desprendidas, mayor cohesión guardaban con las contiguas, es decir, que no había un corte concreto donde el BTC rompía, sino que perdía cohesión mientras las capas estuvieran más alejadas del núcleo.

Como comprobación cualitativa del bloque, una vez ensayado, se verificó su resistencia general a machacado rompiendo las probetas con las manos. Se podía observar que había perdido la solidez que había adquirido después del curado. Se desmenuzaban y partían fácilmente. No obstante, se apreciaba que la serie IIIa ofrecía mucha mayor dificultad a esta acción, y se podía notar que su estructura era más pétreo que, por ejemplo, las series II y IIIb, que eran más granuladas.

Después de describir los ensayos, se procede a exponer los resultados de los mismos. El programa informático ofrece una correlación entre la deformación acumulativa y las cargas instantáneas necesarias. La tabla 5.2 muestra, además de estas cargas y deformaciones, las demás magnitudes según los cálculos realizados.

BTC	$Q_{\text{máx}}$ (KN)	Superficie (mm ²)	$R_{\text{máx}}$ (MPa)	Def. $R_{\text{máx}}$ (%)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
I1	16,308	11664	1,398	8,21	629,84	1,708
I2	14,597	11772	1,240	9,20	623,92	1,699
I3	13,234	11936	1,109	6,72	614,68	1,722
I4	12,246	12155	1,007	9,31	619,88	1,719
II1	32,539	12487	2,606	13,03	674,27	1,705
II2	33,829	12148	2,785	11,17	655,97	1,702
II3	29,413	11826	2,487	11,37	638,60	1,705
II4	34,307	11664	2,941	13,22	629,86	1,771
IIIa1	59,398	12426	4,780	17,02	683,43	1,627
IIIa2	49,930	11881	4,203	15,68	653,44	1,620
IIIa3	46,746	12208	3,829	14,13	671,44	1,602
IIIa4	60,570	11990	5,052	16,84	659,45	1,634
IIIb1	29,622	11607	2,552	16,31	638,39	1,525
IIIb2	23,009	11990	1,919	16,51	653,46	1,517
IIIb3	25,012	11610	2,154	17,47	626,94	1,541
IIIb4	25,132	11825	2,125	16,49	650,38	1,483

Tabla 5.2. Valores de los ensayos

La tabla 5.3 muestra a su vez los valores medios de las cuatro probetas de cada serie.

BTC	$Q_{\text{máx}}$ (KN)	Superficie (mm ²)	$R_{\text{máx}}$ (MPa)	Def. $R_{\text{máx}}$ (%)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
I	14,096	11881	1,189	8,36	637,07	1,672
II	32,522	12031	2,705	12,20	649,67	1,721
IIIa	54,161	12126	4,466	15,92	666,94	1,621
IIIb	25,694	11758	2,188	16,69	642,29	1,516

Tabla 5.3. Valores medios de los ensayos

Los valores anteriores son determinados por la información aportada por el programa informático, cuyos resultados vienen expresados en una gráfica tensión-deformación, en la que las líneas muestran el comportamiento de cada uno de los BTC a los esfuerzos de tracción.

5.3. Análisis de los resultados

Estas gráficas son las correspondientes a las figura 5.4 y 5.5, representando cada una de las series con su escala particular:

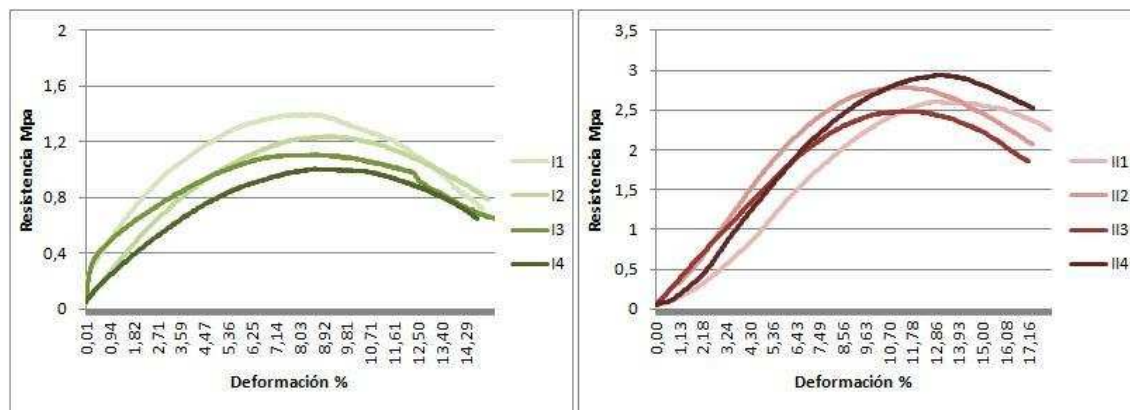


Fig. 5.4. Diagramas tensión-deformación de las series I y II

Se ve por las formas de las curvas que los bloques que han sido sometidos a una compresión en su fabricación ofrecen una sinuosidad característica que no comparten con las probetas comprimidas a mano. Con indiferencia de la resis-

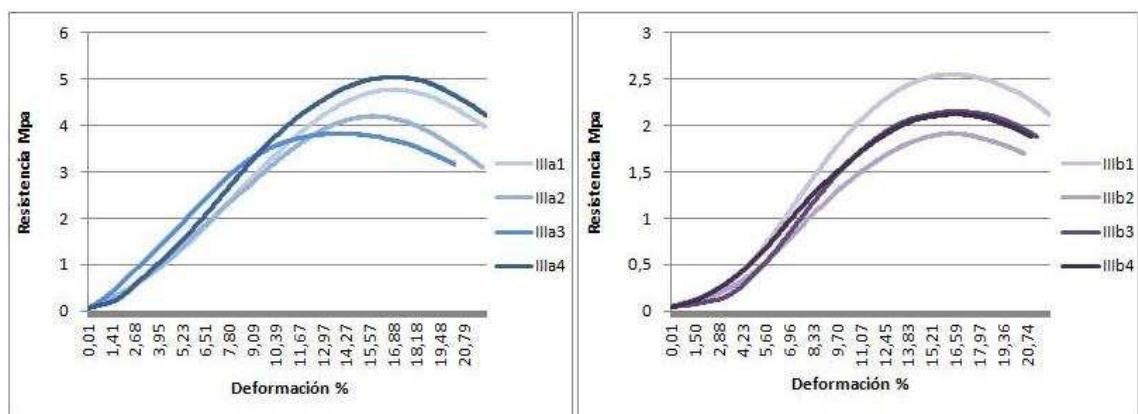


Fig. 5.5. Diagramas tensión-deformación de las series IIIa y IIIb

tencia máxima, que se analizará posteriormente, está claro que los valores de cada serie siguen una consonancia, por lo que se pueden descartar desde el inicio valores atípicos.

Para la representación de las gráficas se ha elegido diferenciar las series por colores básicos y cada una de las probetas con una tonalidad diferente entre las del color asignado. Así, todos los BTC ensayados están representados en la siguiente gráfica:

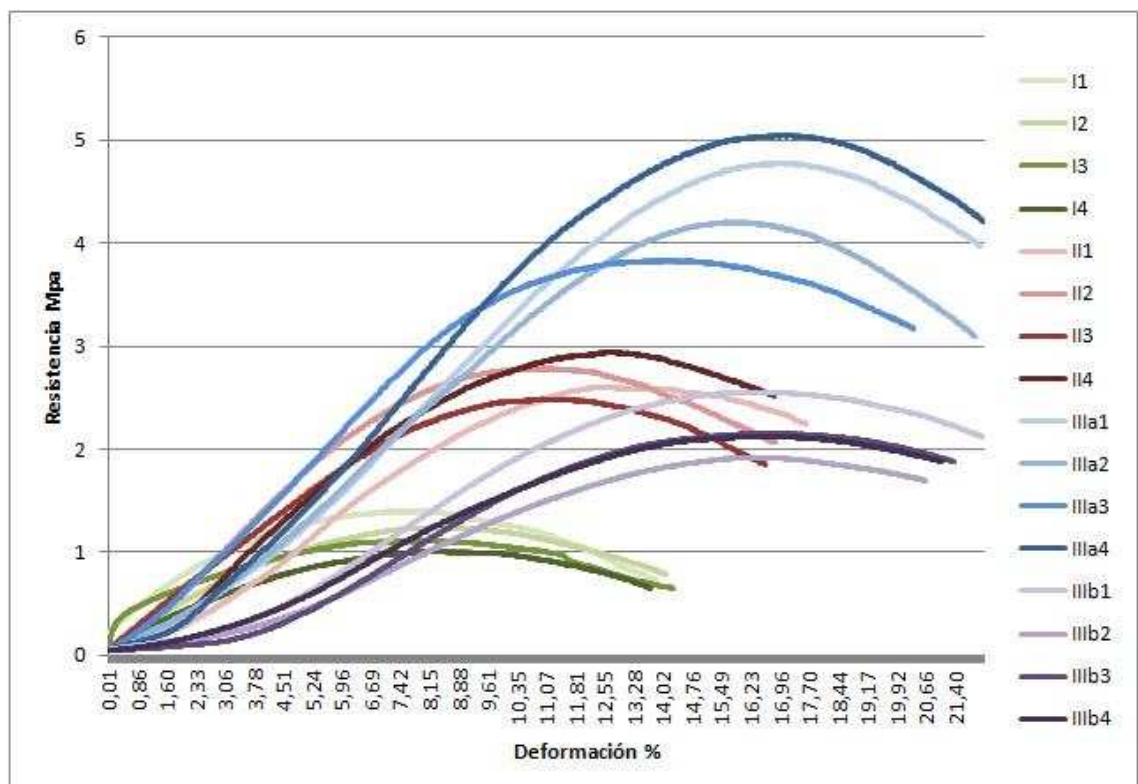


Fig. 5.5. Diagramas tensión-deformación en conjunto

Aquí en la figura 5.5, con el mismo valor de escala, se ve más claramente las diferencias de resistencias y de deformaciones entre las distintas series. La serie IIIa es con diferencia la que más resistencia máxima ofrece a la compresión, después las series II y IIIb están a un nivel menor pero semejante entre ellas, aunque ligeramente superior la II, y por último la serie I presenta las resistencias más bajas. Desde la perspectiva de las deformaciones, se puede comprobar que las series IIIa y IIIb tienen una gran capacidad de deformación; en la IIIb, incluso después de alcanzar su resistencia máxima, se reducen levemente los valores de esfuerzo necesario después de rotura. La serie II presenta deformaciones moderadas y la I es fácilmente deformable comparándola con el resto.

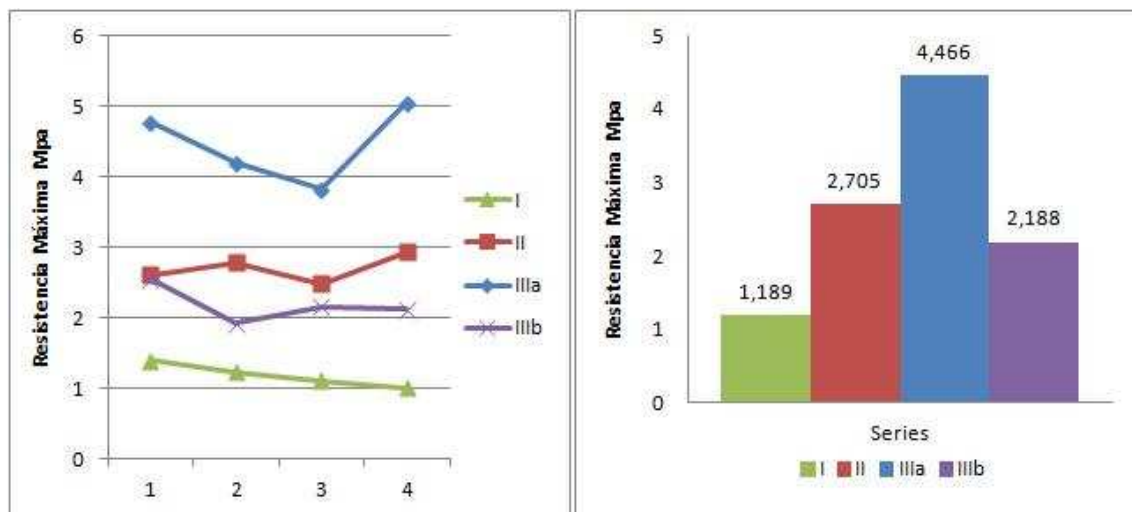


Fig. 5.6. Diagramas de resistencia máxima

Viendo la figura 5.6, se puede afirmar al comparar las series I y II, que la compresión previa del bloque a la hora de fabricarlo es beneficiosa para aumentar la resistencia del BTC. La compactación hace que reduzca la densidad del mismo aumentando la compacidad. Por otro lado, comparando las series II y IIIa se concluye ciertamente que la adición de nanosílice en la mezcla aumenta considerablemente la resistencia a compresión del BTC, como se había previsto en las suposiciones del ensayo. Tan sólo con un 1 % de proporción en peso se ha conseguido un incremento de resistencia media del 65 %. Por otro lado el exceso de agua perjudica seriamente las características

mecánicas del bloque. Con casi la mitad más de agua, la serie IIIb ofrece unas resistencias menores del 50 % que la serie IIIa, conteniendo la misma cantidad de nanosílice. Esta situación debe ser causa de la pérdida de densidad una vez curadas las probetas, al haber perdido el agua; dejando espacios rellenos con aire en su lugar.

Los aspectos que se acaban de comentar: la densidad y la humedad, son claves a la hora de alcanzar una resistencia a compresión alta. Comparando las serie I y II por un lado, y las series IIIa IIIb, se concluyen estos factores. Sin embargo, en cuanto a la densidad, cabe decir que su diferencia entre las probetas no parece tan considerable como para ofrecer tanta diferencia de resistencia en las probetas ensayadas. De hecho, entre las series I y II hay una mínima diferencia en la densidad, para ser la resistencia de la segunda más de dos veces mayor que la de la primera. Por ello, los resultados pueden sugerir otros factores beneficiosos además del aumento de densidad a la hora de compactar los BTC mecánicamente. Estos pueden ser: mejor colocación de los gránulos de los áridos dentro del bloque, mayor acercamiento de las partículas que intervienen en las reacciones mejorando las mismas, eliminación de posibles huecos en el interior, que pueden aparecer más fácilmente en el caso de compresión manual.

La humedad es otro factor fundamental que, al revés que la densidad, es inversamente proporcional a la resistencia. El excesivo aumento de agua en la composición de la serie IIIb nos indica que, aunque mejoró apreciablemente la trabajabilidad de la tierra con nanosílice, dejó inútil la adición de la misma, por lo que entre ambas series habría que determinar una cantidad de agua óptima para ambos aspectos.

Para el siguiente análisis se muestra un gráfico de las deformaciones de las probetas y series en el momento de resistencia máxima (fig. 5.7).

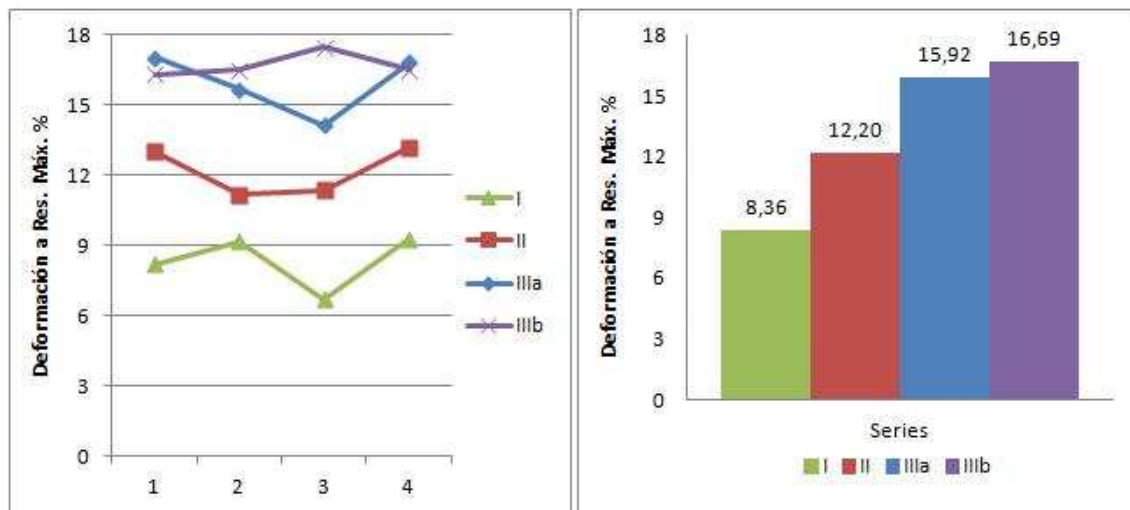


Fig. 5.7. Deformación a resistencia máxima

Como antes, la compactación previa aumenta la deformación absoluta del bloque, pero lo más característico de estos diagramas es comprobar que la adición de nanosílice aumenta significativamente la capacidad de deformación de los BTC. No sólo la serie IIIa tiene una deformación alta, también la IIIb que, con menos resistencia máxima que la serie II, ofrece una mejor capacidad de deformación ante la compresión. De hecho es un 37 % mayor que la serie confeccionada sin nanosílice.

La semejanza entre las deformaciones de las series IIIa y IIIb también indica que la cantidad de agua no es necesariamente influyente en la capacidad de deformación de los BTC, ya que los huecos dejados por la evaporación del agua durante el curado de los bloques son ocupados progresivamente por los materiales sólidos del propio bloque a la hora de someterlo a esfuerzos de compresión.

6. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo están relacionadas con los objetivos propuestos al principio del mismo. Según los resultados obtenidos y discutidos en el apartado anterior, las conclusiones obtenidas del estudio son las siguientes:

6.1. Influencia del tamaño de partícula de sílice

La adición de una pequeña proporción de nanosílice en los BTC otorga un gran aumento de la resistencia a compresión de los mismos. Se puede concluir, como se esperaba en el ánimo de este trabajo, que la disminución en el tamaño de partícula de los productos basados en sílice produce mayores resistencias en su reacción con estabilizantes basados en el calcio, como pueden ser el cemento, el yeso o la cal hidratada, como es el caso de este estudio.

No sólo la resistencia es mejorada con esta adición, sino que su plasticidad es aumentada también en gran medida, aspecto reflejado en la capacidad de deformación de todas las probetas que contenían nanosílice.

6.2. Influencia de la compactación de los bloques de tierra

La compactación mecánica de los BTC también otorga mayores resistencias a compresión. La única diferencia entre las series sin nanosílice del ensayo era el tipo de compactación y se ha podido comprobar que la mecánica mejora no sólo las características mecánicas, sino también la plasticidad del BTC.

Por otro lado, un exceso de agua es seriamente perjudicial para las capacidades mecánicas de los BTC, ya que la evaporación de toda esa agua durante el curado disminuye la densidad. No obstante, la plasticidad del bloque no se ve afectada por el aumento de agua, al menos en presencia de la nanosílice.

6.3. Valoración de los estabilizantes usados

Como conclusión general se puede afirmar que es favorable la disminución del tamaño de partícula de los productos basados en la sílice para confeccionar BTC. Asimismo, los productos basados en el calcio son imprescindibles para formar gel C-H-S durante su curado para crear resistencias notablemente mayores que con otros estabilizantes.

La disminución del tamaño de partícula de sílice mejora tanto la resistencia a compresión como la plasticidad de los BTC, aunque influye perjudicialmente en la trabajabilidad de la tierra para producirlos.

7. Futuras líneas de investigación

En cuanto a los resultados discutidos en este trabajo, se debería abrir una vía para el estudio de la proporción óptima de agua que se debe incluir en la composición de un BTC con nanosílice. Las probetas aquí estudiadas formaban posiblemente ambos extremos en cuanto a resistencia y trabajabilidad, así que una variación progresiva de la cantidad de agua ofrecería resultados interesantes.

También la densidad podría ser estudiada para comprobar su influencia real en la resistencia a compresión de los BTC. Una progresión de la compactación de las probetas ofrecería un gráfico con una curva representando la correlación real entre la densidad y la resistencia.

En lo referentes a aspectos no estudiados en este trabajo, deberían ensayarse los BTC con diferente tamaño de partícula también a resistencia a flexión, resistencia a la intemperie o durabilidad e incluso su resistencia química. Son factores importantes que se necesitan mejorar en los materiales de construcción con tierra. Los BTC podrían tener también en su composición diferentes clases de fibras para mejorar las características a tracción.

Todos estos estudios aumentarían el conocimiento sobre la idea fundamental de este trabajo, que es la mejora de los BTC a través de la adición de materiales de sílice de menores tamaños de partícula.

Agradecimientos

En primer lugar a mi tutor, Mariano González Cortina, por llevar mi Trabajo Fin de Máster y guiarme en todo momento sobre lo que he necesitado.

En segundo lugar a Santiago de la Ribera, que me ha aconsejado y ayudado durante la producción de las probetas y los ensayos.

Después a mis compañeros de laboratorio, Óscar, Alicia y María, que hacían aquellas tardes de manualidades más llevaderas. Mención especial a Álvaro Parra, que vino a ayudarme para amasar las probetas y poder concluir las a tiempo.

También quería agradecer a Francisco Fernández, profesor del Máster, por facilitarme la nanosílice para el ensayo y aconsejarme sobre cuestiones químicas.

Bibliografía

- [1] Construcciones de Adobe Resistentes a los Terremotos. Marcial Blondet, Gladys Villa, Svetlana Brzev. Enciclopedia Mundial de Vivienda del EERI/IAEE. 2003
- [2] Introducción a la Construcción con Tierra. Ignacio de Oteiza. Arquitectura y Construcción de Tierra, Tradición e Innovación. 2002
- [3] La Tierra como Material de Construcción. Gabriel Pons. San Salvador. 2001
http://ieham.org/html/docs/La_tierra_como_material_de_construcion.pdf
- [4] Propiedades Físicas y Químicas del adobe. Renato Sepúlveda, Joaquín Vega. Universidad Internacional SEK, Santiago de Chile. 2007
<http://sepulvedavega.blogspot.com/>
- [5] La Arquitectura Tradicional como Expresión de la Cultura Popular y Manifestación de su Matriz Vernácula. Fernando Vela Cossío. Arquitectura y Construcción de Tierra, Tradición e Innovación. 2002
- [6] Historia de la Construcción. Francisco Ortega. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Las Palmas de Gran Canarias. 2009
http://editorial.cda.ulpgc.es/estructuras/construccion/1_historia/index.htm
- [7] La Arquitectura Construida con Tierra en el Umbral del Siglo XXI. Luis Maldonado, David Rivera. Arquitectura y Construcción de Tierra, Tradición e Innovación. 2002
- [8] Norma Tecnológica de la Edificación E.080:2006. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. Gobierno de Perú.
- [9] Investigación Tecnológica Aplicada. Domocaña. Raquel Barrionuevo. Informes de la Construcción. 2010

- [10] Construcciones con Tierra en Situaciones de Necesidad. La Tierra frente al Agua y al Sismo. Julián Salas Serrano. Arquitectura y Construcción de Tierra, Tradición e Innovación. 2002
- [11] Construcción con tierra en el siglo XXI. S. Bestraten, E. Hormías, A. Altemir. Informes de la Construcción. 2010
- [12] Manual para la Rehabilitación de Viviendas Construidas en Adobe y Tapia Pisada. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2004
- [13] Construcción con Tierra: Materias Primas. J. Cid, I. Cañas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid
- [14] Mud House of Bangladesh. A. Das, M. Shariful, J. Alam, N. Hoque. World Housing Encyclopedia. 2007
- [15] Traditional rural house in Kutch region of India (bhonga). M. Choudhary, K. S. Jaiswal, R. Sinha. World Housing Encyclopedia. 2002
- [16] Unburnt brick wall building with pitched roof (nyumba ya zidina). M. Sassu, I. Ngoma. World Housing Encyclopedia. 2002
- [17] AENOR. UNE 41410 de diciembre de 2008. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. 2008
- [18] Directiva 89/106/CEE de 21 de diciembre de 1988 relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros sobre los productos de construcción. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. Consejo de las Comunidades Europeas. 1988
- [19] Norma E.080 de 10 de junio de 2006: Adobe. Ministerio de Vivienda, Construcción y Mantenimiento. Gobierno de Perú. 2006

[20] Las Normativas de Construcción con Tierra en el Mundo. J. Cid, F. R. Mazarrón, I. Cañas. Informes de la Construcción. 2010

[21] Norma UNE del Bloque de Tierra Comprimida. Toni Marín. Revista EcoHabitar número 22. Eco-Diseño. 2009

[22] Proyecto Terra Uruguay. Montaje de Prototipos de Vivienda a través de la Utilización de Tecnologías en Tierra: Adobe, Fajina y BTC. R. Etchebarne, G. Piñeiro, J. C. Silva. Unidad Regional de Estudios y Gestión del Hábitat. Uruguay. 2005

[23] Construcción con Tierra: Materias Primas. Jaime Cid, Ignacio Cañas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. 2009

<http://www.construtierra.org/documents/PanelMPrimasbajacalidad.pdf>

[24] Bioclimatismo y Construcción con Tierra en la Obra de Hassan Fathy: el Ejemplo de Nueva Gourná. Miguel Ángel Gálvez. Arquitectura y Construcción de Tierra, Tradición e Innovación. 2002

[25] Propiedades Térmicas de Materiales de Construcción y Aislantes. Miliarium.com.

<http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>

[26] Las Arcillas: Propiedades y Usos. E. García (UCM), M. Suárez (USAL).

<http://campus.usal.es/~delcien//doc/GA.pdf>

[27] Estabilizantes para los Adobes. Gracomaq E. U. Medellín. Colombia.

http://gracomaq.net/index_archivos/estabilizantes.htm

[28] Ciclo de la Cal. Unicmall. Mallorca.

http://www.unicmall.com/docs/ciclo_de_la_cal.pdf

- [29] Revocos tradicionales con morteros de cal y estucos. I jornada técnica. Juan Rivas, Roberto Villalvilla. 2005
<http://www.grupovitrivio.org/jornadacal/revocos.htm>
- [30] Materiales de Construcción: Cemento Portland. E. Bravo, A. Cornejo. Recinto Universitario de Mayagüez. Universidad de Puerto Rico.
http://www.uprm.edu/civil/circ/newsite/webresearchers/LuisGodoy/courses/INCI6017/10%20Materiales/Cemento_Fabricacion.pdf
- [31] Silica nanoparticle addition to control the calcium-leaching in cement-based materials. J. Gaitero, Y. Sáez de Ibarra, E. Erkizia, I. Campillo. Fundación Labein. 2006
- [32] Product Info. Gaia Nanosilica. Cognoscible Technologies.
<http://www.cognoscibletechnologies.com/docs/gaia-nanosilica.pdf>
- [33] Influence of Nano-Silica Particles on Mechanical Properties and Permeability of Concrete. M. Khanzadi, M. Tadayon, H. Sepehri, M. Sepehri. Coventry University and University of Wisconsin-Madison. Centre for By-products Utilization. 2010
- [34] Influence of Nano-Sized Mineral Additions on Performance of SCC. S. Collepardi, A. Borsoi, J. Ogoumah, R. Troli, M. Collepardi, A. Curzio. 6th International Congress, Global Construction, Ultimate Concrete Opportunities, Dundee, U.K. 2005
- [35] Nanomaterials and Nanotechnology for High-performance Cement Composites. K. Sobolev, I. Flores, R. Hermosillo, L. Torres-Martínez. American Concrete Institute Convention. 2006
- [36] Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks. Y. Millogo, M. Hajjaji, R. Ouedraogo. Construction and Building Materials 22. Elsevier. 2008

- [37] Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure. A. Guettala, A. Abibsi, H. Houari. Construction and Building Materials 20. Elsevier. 2006
- [38] Potential use of stockpiled circulating fluidized bed combustion ashes in manufacturing compressed earth bricks. Chang-Seon Shon, Don Saylak, Dan G. Zollinger. Construction and Building Materials 23. Elsevier. 2009
- [39] Compressive strength testing of compressed earth blocks J. C. Morel, A. Pkila, P. Walker. Construction and Building Materials 21. Elsevier. 2007
- [40] Earth building in Spain. M. Carmen Jiménez, Ignacio Cañas. Construction and Building Materials 20. Elsevier. 2006
- [41] Engineering characteristics of the compressed-stabilized earth brick. Agus Setyo. Construction and Building Materials 25. Elsevier. 2011
- [42] The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization. Nurhayat Degirmenci. Construction and Building Materials 22. Elsevier. 2008
- [43] Sustainable housing in island conditions using Alker-gypsum-stabilized earth: A case study from northern Cyprus. Bilge Isika, Tugsad Tulbentci. Building and Environment 43. Elsevier. 2008
- [44] Gypsum and Lime Stabilized Soil (Alker Technology). Geopolymer House Blog. Owen Geiger. 2011
<http://geopolymerhouses.wordpress.com/2011/06/22/gypsum-and-lime-stabilized-soil-alker-technology/>
- [45] The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. Sükrü Yetgin, Özlem Çavdar, Ahmet Çavdar. Construction and Building Materials 22. Elsevier. 2008

[46] The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. M. Carmen Jiménez, Ignacio Cañas. Construction and Building Materials 21. Elsevier. 2007

[47] AENOR. UNE 103101 de junio de 1995. Análisis granulométrico de suelos por tamizado. 1995

Anexos:

Anexo 1. Ficha técnica de la cal hidratada Calcasa

Anexo 2. Fichas técnica y de seguridad de la nanosílice Sigma

Anexo 3. Análisis granulométrico del árido

StabyCAL CL-90S
Ref: HT-CLA-18
Hidróxido de Calcio – Hidrato de cal

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Producto utilizado para la mejora y/ o estabilización de suelos.
Este producto cumple los requisitos de la norma
UNE 80502 “Cales Vivas o Hidratadas para la Estabilización de Suelos”.

Producto: Cal Hidratada	Fecha: mayo 2010
Revisión: 3	Página: 1 de 1

Nombre Químico : Hidróxido de Calcio
Nombre Comercial : StabyCAL CL-90S, Cal hidratada .
Fórmula Química : $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
Densidad granel: < 600 kg/m³
Aspecto: Polvo de color blanco.
Reacción alcalina fuerte al disolverse en agua.

CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

Granulometría	Valor Típico	Límites
Retenido sobre tamiz de 0,2 mm	0,2%	2% máximo
Retenido sobre tamiz de 0,09 mm	6%	15% máximo

Propiedad	Unidad	Valor Típico	Límites
CaO + MgO*	% masa	92	90 mínimo
MgO		0,4	1,0 máximo
CO ₂		2	4 máximo

*Sobre muestra calcinada a 1.000°C.

Los datos mencionados son valores medios representativos de la calidad del producto. Pueden estar sujetos a ligeras variaciones debidas a la naturaleza de su materia prima.

La cal viva o hidratada mejora las características geotécnicas de los suelos arcillosos a corto plazo reduciendo el IP y a largo plazo aumentando el CBR de forma que pueden aprovecharse una vez estabilizados o mejorados como suelos adecuados para la construcción de viales de todo tipo.

Formas de suministro: Camión abierto o sistemas con descarga neumática.
El producto es estable a largo plazo. Puede almacenarse durante tiempo ilimitado si se evita el contacto con el H₂O y CO₂. Debe almacenarse alejado de los ácidos.
Existe Hoja Técnica de Seguridad que se suministra bajo simple demanda. (T: 943 653243).
Identificación Internacional de Producto:
CAS 1305-62-0 (Chemical Abstracts Service Registry Number).
EINECS 215-137-3 (European Inventory of Existing Chemical Substances).

* El marcado CE es obligatorio para cales destinadas a la construcción. Dicho marcado no impide y limita su uso en otras aplicaciones



3050 Spruce Street
Saint Louis, Missouri 63103 USA
Telephone 800-325-5832 • (314) 771-5765
Fax (314) 286-7828
email: techserv@sial.com
sigma-aldrich.com

ProductInformation

FUMED SILICA

Product Number **S 5130**

Replacement for Product Code 38,126-8

CAS NUMBER: 112945-52-5

SYNONYMS: fumed silicon dioxide, Aerosil™, Cab-O-Sil™

PHYSICAL DESCRIPTION:

Fumed silica is composed of submicron-sized spheres, which are 40-60% fused into short chains, very highly branched, 0.1-0.2 microns long. The spheres are quite uniform in size for a given product, but the chain lengths are quite variable, 10 to 30 units in length. The surface area, which varies with the particle size, gives a good approximation of the sphere diameter. The smaller the particles, the larger the estimated surface area.²

Sigma product	Particle size (μm)	Surface area (m ² /gram)	Density (lb/cu. ft)
S5130	0.007	390 ∇ 40	2.3
S5255	0.008	325 ∇ 25	2.3
S5380	0.011	255 ∇ 15	4.5 ∇ 0.5
S2128	0.012	200 ∇ 25	2.3
S5505	0.014	200 ∇ 25	2.3

METHOD OF PREPARATION:²

Silicon tetrachloride is burned in a flame of hydrogen and oxygen (at approximately 1800EC) to produce molten spheres of silicon dioxide (and hydrogen chloride). Depending on process parameters, the size of these silica spheres can be varied and, within a given batch, show excellent uniformity (by electron micrograph). The molten spheres collide and fuse with one another to form branched, three-dimensional chain-like aggregates.

FUMED SILICA
Sigma Prod. Nos. S5130, S5255,
S5380, S2128 and S5505

METHOD OF PREPARATION:² (continued)

Many aggregates have chains from 10 to 30 spheres in length, or from 0.1 to 0.2 microns (μm) in length. As the aggregates cool down below the fusion temperature of silica (approximately 1710EC), further collisions result in some reversible mechanical entanglement or agglomeration. Further agglomeration occurs during the collection process; this can be reversed by proper dispersion in a suitable medium.

During the formation of the product, hydroxyl groups become attached to some of the silicon atoms on the surface of the silica particles, making the surface hydrophilic and capable of hydrogen bonding with suitable molecules. There are (estimated) 3.5-4.5 hydroxyl groups per square millimicron of silica surface, compared to a theoretical maximum of 7.85. The structure of fumed silica is amorphous (as indicated by absence of lines in its X-ray diffraction pattern.)

The surface area was determined by calculation using a nitrogen adsorption method of Brunauer³, and the value used to calculate particle diameter.

The residual hydrogen chloride on the surface of the fumed silica was reduced to less than 200 ppm by calcining.² The moisture content of the product will vary, depending on storage conditions. Moisture adsorbed on the surface can be removed by evacuation at room temperature (at 10^{-2} mm Hg) or by heating at 110EC. (If the product is heated above 800EC, it sinters irreversibly.)

STORAGE / STABILITY AS SUPPLIED:

These products are stable indefinitely at room temperature if kept dry. Their tendency to adsorb moisture suggests an effective shelflife of about two years, once opened.

SOLUBILITY / SOLUTION STABILITY:²

Fumed silica will form dispersions in water, glycerine, butyl alcohol, mineral oil and a variety of other liquids, causing them to thicken or form gels. The dispersions often have thixotropic properties, i.e., viscosity that varies with rate of stirring.

For liquids with minimal hydrogen bonding, small amounts of fumed silica will increase the viscosity. Addition from 3 to 5% by weight usually suffices to cause the liquid to form a gel. After an initial thorough dispersion, increasing the mixing time has little effect on the viscosity for a given percent of silica.

For liquids with a high degree of hydrogen bonding, small amounts of fumed silica will also increase the viscosity. However, usually 10% or more (by weight) will be needed to form gels. The initial dispersion is rapid. If the dispersion is mixed too long, the result will be an irreversible decrease in viscosity.

SOLUBILITY / SOLUTION STABILITY:²

Dispersions formed with fumed silica are quite stable, remaining unchanged for weeks to months, over a range of temperatures.

FUMED SILICA
Sigma Prod. Nos. S5130, S5255,
S5380, S2128 and S5505

USAGE:

Fumed silica have been used commercially in a wide range of applications to enhance viscosity of many liquids, including paints. The most common application in biochemistry is for clarifying sera by removing lipids.

For years, serum could be delipidized very easily using a solvent, 1,1,2-trichlorotrifluoroethane (Sigma product number T5271). This was offered under a trade name "Lipoclean", and cited methods suggested the use of three parts solvent to two parts serum - or vice versa.⁴ In 1993, OSHA-directed regulations became effective concerning the labeling of products exposed to chlorofluorocarbons (CFC's) during their manufacture. This has led to the need for alternate methods of clarifying serum-related products, especially if they are to be sold commercially.

Two methods are reported to be successful, each with its own limitations: dextran sulfate extraction and fumed silica precipitation. The use of dextran sulfate MW 500,000 (Sigma product number D6001) has been reported.⁵ However, it does tend to bind blood clotting factors and, in fact, has been used to isolate factors II and X.⁶ Use of fumed silica has generally been successful; one trade name reported is Aerosil 380; Sigma's comparable product is S5130, 0.007 micron particles.

GENERAL PROCEDURE FOR DELIPIDIZING SERUM:⁶

Add 20 g of fumed silica, Sigma product S5130/L serum (or 20 mg/mL serum), mix well for 2-3 hours or overnight. Centrifuge at 2000 g for 15 minutes. Wash the pelleted silica with buffer, then recentrifuge the supernatant liquid. Any pellet can be re-washed to recover as much serum as possible.

Disadvantages:

- a. About 15% of the sample volume will be irretrievably lost, adsorbed to the silica.
- b. The fumed silica is extremely fluffy and somewhat difficult to handle. The use of a fine-dust filter respirator is recommended. The fumed silica must be added as a dry powder to the serum, since once it is wet, the silica becomes very slimy and is extremely hard to handle as a heavy precipitate.
- c. The silica is suitable for serum but cannot be used on plasma. The surface will activate clotting factors.

REFERENCES:

1. Sigma quality control.
2. Supplier data.
3. Brunauer, S. et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 60, 309 (1938).
4. *Clin. Chim. Acta*, 148, 125-130 (1985) and *Clin. Chem.*, 36, 1675-1678 (1990).
5. Agnese et al., *Clin. Biochem.*, 16, 98-100 (1983).
6. Sigma production department.

Sigma warrants that its products conform to the information contained in this and other Sigma-Aldrich publications. Purchaser must determine the suitability of the product(s) for their particular use. Additional terms and conditions may apply. Please see reverse side of the invoice or packing slip.

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 4.1 Fecha de revisión 15.11.2011

Fecha de impresión 15.12.2011

1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA O LA MEZCLA Y DE LA SOCIEDAD O LA EMPRESA

1.1 Identificadores del producto

Nombre del producto : Silica, fumed

Referencia : S5130

Marca : Aldrich

No. CAS : 112945-52-5

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados : Reactivos para laboratorio, Fabricación de sustancias

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía : Sigma-Aldrich Química SA
Ronda de Poniente, 3
Aptdo. Correos 278
E-28760 TRES CANTOS -MADRID

Teléfono : +34 91 6619977

Fax : +34 91 6619642

E-mail de contacto : eurtechserv@sial.com

1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de Urgencia : 704100087

2. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

No es una sustancia o mezcla peligrosa de acuerdo con el Reglamento (CE) No. 1272/2008.

Esta sustancia no está clasificada como peligrosa según la Directiva 67/548/CEE.

2.2 Elementos de la etiqueta

El producto no necesita ser etiquetado de acuerdo con las directivas de la Comunidad Europea ó las respectivas leyes nacionales.

2.3 Otros Peligros - ninguno(a)

3. COMPOSICIÓN/INFORMACIÓN SOBRE LOS COMPONENTES

3.1 Sustancias

Sinónimos : Silicic anhydride
Silicon dioxide amorphous
Silica
Silicon dioxide

Formula : O₂Si

Peso molecular : 60,08 g/mol

4. PRIMEROS AUXILIOS

4.1 Descripción de los primeros auxilios

Recomendaciones generales

Consultar a un médico. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

Si es inhalado

Si aspiró, mueva la persona al aire fresco. Si ha parado de respirar, hacer la respiración artificial. Consultar a un médico.

En caso de contacto con la piel

Eliminar lavando con jabón y mucha agua. Consultar a un médico.

En caso de contacto con los ojos

Lavar abundantemente los ojos con agua como medida de precaución.

Si es tragado

Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. Enjuague la boca con agua. Consultar a un médico.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Según nuestras informaciones, creemos que no se han investigado adecuadamente las propiedades químicas, físicas y toxicológicas.

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

sin datos disponibles

5. MEDIDAS DE LUCHA CONTRA INCENDIOS**5.1 Medios de extinción****Medios de extinción apropiados**

Usar agua pulverizada, espuma resistente al alcohol, polvo seco o dióxido de carbono.

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

óxidos de silicio

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

Si es necesario, usar equipo de respiración autónomo para la lucha contra el fuego.

5.4 Otros datos

sin datos disponibles

6. MEDIDAS EN CASO DE VERTIDO ACCIDENTAL**6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia**

Utilícese equipo de protección individual. Evite la formación de polvo. Evitar respirar los vapores, la neblina o el gas. Evitar respirar el polvo.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza

Recoger y preparar la eliminación sin originar polvo. Limpiar y traspalar. Guardar en contenedores apropiados y cerrados para su eliminación.

6.4 Referencia a otras secciones

Para eliminación de desechos ver sección 13.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO**7.1 Precauciones para una manipulación segura**

Evítese la formación de polvo y aerosoles.

Debe disponer de extracción adecuada en aquellos lugares en los que se forma polvo.

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Almacenar en un lugar fresco. Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado.

Higroscópico.

7.3 Usos específicos finales

sin datos disponibles

8. CONTROLES DE EXPOSICIÓN/ PROTECCIÓN INDIVIDUAL

8.1 Parámetros de control

Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.

No contiene sustancias con valores límites de exposición profesional.

8.2 Controles de la exposición

Controles técnicos apropiados

Manipular con las precauciones de higiene industrial adecuadas, y respetar las prácticas de seguridad. Lávense las manos antes de los descansos y después de terminar la jornada laboral.

Protección personal

Protección de los ojos/ la cara

Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE.UU.) o EN 166 (UE).

Protección de la piel

Manipular con guantes. Los guantes deben ser controlados antes de la utilización. Utilice la técnica correcta de quitarse los guantes (sin tocar la superficie exterior del guante) para evitar el contacto de la piel con este producto. Deseche los guantes contaminados después de su uso, de conformidad con las leyes aplicables y buenas prácticas de laboratorio. Lavar y secar las manos.

Los guantes de protección seleccionados deben de cumplir con las especificaciones de la Directiva de la UE 89/686/CEE y de la norma EN 374 derivado de ello.

Protección Corporal

Elegir la protección para el cuerpo según sus características, la concentración y la cantidad de sustancias peligrosas, y el lugar específico de trabajo., El tipo de equipamiento de protección debe ser elegido según la concentración y la cantidad de sustancia peligrosa al lugar específico de trabajo.

Protección respiratoria

Proteccion respiratoria no requerida. Donde la protección sea deseada Usar respiradores y componenetes testados y aprovados bajo los estandards guvernamentales apropiados como NIOSH (EEUU) o CEN (UE)

9. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

- | | |
|--|---------------------------------------|
| a) Aspecto | Estado físico: polvo |
| b) Olor | sin datos disponibles |
| c) Umbral olfativo | sin datos disponibles |
| d) pH | 3,6 - 4,3 a 40 g/l |
| e) Punto de fusión/ punto de congelación | Punto/intervalo de fusión: > 1.600 °C |
| f) Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición | 2.200 °C a 1.013 hPa |
| g) Punto de inflamación | no aplicable |
| h) Tasa de evaporación | sin datos disponibles |
| i) Inflamabilidad (sólido, gas) | sin datos disponibles |
| j) Inflamabilidad superior/inferior o límites explosivos | sin datos disponibles |
| k) Presión de vapor | sin datos disponibles |

l)	Densidad de vapor	sin datos disponibles
m)	Densidad relativa	sin datos disponibles
n)	Solubilidad en agua	insoluble
o)	Coeficiente de reparto n-octanol/agua	sin datos disponibles
p)	Temperatura de auto- inflamación	sin datos disponibles
q)	Temperatura de descomposición	sin datos disponibles
r)	Viscosidad	sin datos disponibles
s)	Propiedades explosivas	sin datos disponibles
t)	Propiedades comburentes	sin datos disponibles

9.2 Otra información de seguridad

sin datos disponibles

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

10.1 Reactividad

sin datos disponibles

10.2 Estabilidad química

sin datos disponibles

10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas

sin datos disponibles

10.4 Condiciones que deben evitarse

Su exposición a la humedad puede afectar a la calidad del producto.

10.5 Materiales incompatibles

Ácidos fuertes, Bases fuertes, Fluoruro de hidrógeno, Oxidantes, Amoníaco, difluoruro de oxígeno, Trifluoruro de cloro

10.6 Productos de descomposición peligrosos

Otros productos de descomposición peligrosos - sin datos disponibles

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

11.1 Información sobre los efectos tóxicos

Toxicidad aguda

DL50 Oral - rata - 3.160 mg/kg

Corrosión o irritación cutáneas

sin datos disponibles

Lesiones o irritación ocular graves

sin datos disponibles

Sensibilización respiratoria o cutánea

sin datos disponibles

Mutagenicidad en células germinales

Genotoxicidad in vitro - rata - Pulmones

Ensayo de fluidos corporales

Genotoxicidad in vivo - rata - Intratraqueal

síntesis no prevista de ADN

Carcinogenicidad

Carcinogenicidad - rata - Inhalación

Tumorigeno: Cancerígeno según los criterios RTECS Pulmones, torax o Respiración: Tumores

Este producto es o contiene un componente no clasificable con respecto a su carcinogenia en humanos, basado en su clasificación por IARC (International Agency for Research on Cancer; Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer), ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists; Conferencia de Higienistas Industriales Gubernamentales de los Estados Unidos), NTP (National Toxicology Program; Programa Nacional de Toxicología) de los Estados Unidos o EPA (Environmental Protection Agency; Agencia para la Protección del Medio Ambiente) de los Estados Unidos.

IARC: 3 - Group 3: Not classifiable as to its carcinogenicity to humans (Pyrogenic colloidal silica)

3 - Grupo 3: No clasificable como carcinogénico para los humanos (Pyrogenic colloidal silica)

Toxicidad para la reproducción

sin datos disponibles

Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única

sin datos disponibles

Toxicidad específica en determinados órganos - exposiciones repetidas

sin datos disponibles

Peligro de aspiración

sin datos disponibles

Efectos potenciales sobre la salud

Inhalación	Puede ser nocivo si se inhala. Puede provocar una irritación en el tracto respiratorio.
Ingestión	Puede ser nocivo si es tragado.
Piel	Puede ser nocivo si es absorbido por la piel. Puede provocar una irritación de la piel.
Ojos	Puede provocar una irritación en los ojos.

Signos y Síntomas de la Exposición

Según nuestras informaciones, creemos que no se han investigado adecuadamente las propiedades químicas, físicas y toxicológicas.

Información Adicional

RTECS: VV7310000

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

12.1 Toxicidad

sin datos disponibles

12.2 Persistencia y degradabilidad

sin datos disponibles

12.3 Potencial de bioacumulación

sin datos disponibles

12.4 Movilidad en el suelo

sin datos disponibles

12.5 Resultados de la valoración PBT y mPmB

sin datos disponibles

12.6 Otros efectos adversos

sin datos disponibles

13. CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA ELIMINACIÓN**13.1 Métodos para el tratamiento de residuos****Producto**

Disolver o mezclar el producto con un solvente combustible y quemarlo en un incinerador apto para productos químicos provisto de postquemador y lavador. Ofertar el sobrante y las soluciones no-aprovechables a una compañía de vertidos acreditada.

Envases contaminados

Eliminar como producto no usado.

14. INFORMACIÓN RELATIVA AL TRANSPORTE**14.1 Número ONU**

ADR/RID: -

IMDG: -

IATA: -

14.2 Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas

ADR/RID: Mercancía no peligrosa

IMDG: Not dangerous goods

IATA: Not dangerous goods

14.3 Clase(s) de peligro para el transporte

ADR/RID: -

IMDG: -

IATA: -

14.4 Grupo embalaje

ADR/RID: -

IMDG: -

IATA: -

14.5 Peligros para el medio ambiente

ADR/RID: no

IMDG Marine pollutant: no

IATA: no

14.6 Precauciones particulares para los usuarios

sin datos disponibles

15. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

La hoja técnica de seguridad cumple con los requisitos de la Reglamento (CE) No. 1907/2006.

15.1 Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla

sin datos disponibles

15.2 Evaluación de la seguridad química

sin datos disponibles

16. OTRA INFORMACIÓN**Otros datos**

Copyright 2011 Sigma-Aldrich. Se autoriza la reproducción en número ilimitado de copias para uso exclusivamente interno.

La información indicada arriba se considera correcta pero no pretende ser exhaustiva y deberá utilizarse únicamente como orientación. Sigma-Aldrich, no responderá por ningún daño resultante de la manipulación o contacto con el producto indicado arriba. Ver otros términos y condiciones de venta en el reverso de la factura o de la nota de entrega.

ANEXO A (Normativo)

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO. CÁLCULOS

A	Muestra total seca al aire (g)	2019
B	Masa total retenida sobre el tamiz de 20 mm, lavada y seca (g)	0
C	Porción que pasa por el tamiz de 20 mm, seca al aire ensayada (g)	2019
D	Muestra retenida entre 20 mm y 2 mm, lavada y seca (g)	6
$E = D \times f_1$	Muestra total entre 20 mm y 2 mm, lavada y seca (g)	6
$F = B + E$	Muestra total retenida en el tamiz de 2 mm lavada y seca (g)	6
G	Muestra que pasa tamiz de 2 mm ensayada secada al aire (g)	2013
$H = G \times f$	Muestra que pasa tamiz de 2 mm ensayada y seca (g)	2013
$J = (A-F) \times f$	Muestra total que pasa por el tamiz de 2 mm seca (g)	2013
$K = F + J$	Muestra total seca (g)	2019

Humedad higroscópica (fracción inferior a 2 mm)		
$W = (a/s) \times 100$	Humedad higroscópica	0
--	Referencia tara	
$a = (t+s+a) - (t+s)$	Agua (g)	
$t + s + a$	tara + suelo + agua (g)	
$t + s$	tara + suelo (g)	
t	tara (g)	
$s = (t+s) - t$	suelo (g)	
$f = 100/100+w$	Factor de corrección	1

$f_1 = (A-B)/C$, es el factor de corrección de la muestra comprendida entre 20 mm y 2 mm.
 $f_2 = J/H$, es el factor de corrección de la muestra que pasa por el tamiz de abertura 2 mm.

	Tamices UNE designación y abertura (mm)	Retenido tamices parcial (g)	Retenido tamices totales (g)	Pasa en muestra total		OBSERVACIONES
				(g)	%	
	I	II	III	IV	V	
BLOQUE 1				2019 ⁽¹⁾	100 ⁽²⁾	
BLOQUE 2	20	0	0	2019	100	
	12'5	0	0	2019	100	
	10	0	0	2019	100	
	6'3	0	0	2019	100	
	5	0	0	2019	100	
BLOQUE 3	2	6	6	2013	99'7	
	1'25	10'80	10'80	93'9	89'7	S/ 104'7 S.
	0'40	78'20	89'00	15'7	15'0	
	0'16	10'70	99'70	5	4'7	
	0'08	2'00	101'70	3	2'8	

(1) y (2) Véase apartado 6.1.

ANEXO B (Normativo)

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

